

**НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ  
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ  
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»**

Інститут енергозбереження та енергоменеджменту  
Кафедра теплотехніки та енергозбереження

«На правах рукопису»  
УДК 621.472

«До захисту допущено»

Завідувач кафедри  
\_\_\_\_\_  
(підпис) В.І.Дешко  
(ініціали, прізвище)

“ ” \_\_\_\_\_ 2018 р.

## Магістерська дисертація

зі спеціальності 144 «Теплоенергетика»

спеціалізація «Енергетичний менеджмент та інжиніринг»

на тему: «Чисельний розрахунок параметрів параболоїдного концентратора для сонячної енергетичної установки на базі двигуна Стірлінга»

Виконав: студент VI курсу, групи ОТ – 61м  
(шифр групи)

\_\_\_\_\_  
Славінська Катерина Олександрівна  
(прізвище, ім'я, по батькові)

\_\_\_\_\_  
(підпис)

Науковий керівник доцент, к.т.н., доцент Студенець В.П.  
(посада, науковий ступінь, вчене звання, прізвище та ініціали)

\_\_\_\_\_  
(підпис)

Нормоконтроль доцент, к.т.н., доцент Шкляр В.І.  
(посада, науковий ступінь, вчене звання, прізвище та ініціали)

\_\_\_\_\_  
(підпис)

Рецензент \_\_\_\_\_  
(посада, науковий ступінь, вчене звання, науковий ступінь, прізвище та ініціали)

\_\_\_\_\_  
(підпис)

Рецензент \_\_\_\_\_  
(посада, науковий ступінь, вчене звання, науковий ступінь, прізвище та ініціали)

\_\_\_\_\_  
(підпис)

Засвідчую, що у цій магістерській дисертації  
немає запозичень з праць інших авторів без  
відповідних посилань.

Студент \_\_\_\_\_  
(підпис)

Київ – 2018 року

**Національний технічний університет України  
«Київський політехнічний інститут  
імені Ігоря Сікорського»**

**Інститут (факультет)** Інститут енергозбереження та енергоменеджменту  
(повна назва)

**Кафедра** Теплотехніки та енергозбереження  
(повна назва)

**Рівень вищої освіти – другий (магістерський)**

**Спеціальність** 144 «Теплоенергетика»  
(код і назва)

**Спеціалізація** «Енергетичний менеджмент та інжиніринг»

**ЗАТВЕРДЖУЮ**

Завідувач кафедри

\_\_\_\_\_ В.І. Дешко  
(підпис) (ініціали, прізвище)

«\_\_» \_\_\_\_\_ 2018 р.

**ЗАВДАННЯ**

на магістерську дисертацію студенту  
Славінській Катерині Олександрівні  
(прізвище, ім'я, по батькові)

**1. Тема дисертації** «Чисельний розрахунок параметрів параболоїдного концентратора для сонячної енергетичної установки на базі двигуна Стірлінга»,

**науковий керівник дисертації** Студенець Віктор Петрович, к.т.н, доцент,  
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

**затверджені наказом по університету від** «20» 03 2018 р. № 971-с

**2. Строк подання студентом дисертації** 18 травня 2018р.

**3. Об'єкт дослідження** процеси енергоперетворення у параболоїдному сонячному концентраторі для СЕУ на базі двигуна Стірлінга

**4. Предмет дослідження** енергетичні характеристики ПСК на базі двигуна Стірлінга

**5. Перелік завдань, які потрібно розробити:** 1) аналіз існуючих моделей розрахунку параметрів параболоїдного та параболоциліндричного концентраторів; 2) виведення нових формул обрахунку основних енергетичних характеристик параболоїдного концентратора та порівняння результатів, отриманих за допомогою нових формул та існуючих; 3) створення блок-схеми алгоритму розрахунку параметрів сонячного концентратора; 4) моделювання сонячного параболоїдного концентратора з реальним та ідеальним відбивачам в програмному середовищі Comsol Multiphysics; 5) порівняння отриманих результатів для ПСК з реальним та ідеальним рефлектором; 6) створення

нового програмного забезпечення з урахуванням особливостей чисельного обрахунку сонячних концентраторів в залежності від типу (параболоїд чи параболоцилінд).

**6. Орієнтовний перелік ілюстративного матеріалу** загальні характеристики сонячної енергетики в Україні та в світі; існуючі сонячні ферми; потужні енергетичні установки на базі двигуна Стірлінга; створення нового програмного забезпечення для проектування сонячних концентраторів; моделювання параболоїдного СК в середовищі Comsol; техніко-економічна оцінка проекту; ідея для стартап проекту.

**7. Орієнтовний перелік публікацій** матеріали тез доповідей на XVI міжнародну науково-практичну конференцію «Сучасні проблеми наукового забезпечення енергетики» та на X міжнародну науково-практичну конференцію «Енергетика. Екологія. Людина».

## **8. Консультанти розділів дисертації**

| Розділ | Прізвище, ініціали та посада консультанта | Підпис, дата   |                  |
|--------|-------------------------------------------|----------------|------------------|
|        |                                           | завдання видав | завдання прийняв |
|        |                                           |                |                  |

**9. Дата видачі завдання** 12.03.2018 р.

### **Календарний план**

| № з/п | Назва етапів виконання магістерської дисертації                                                                                      | Термін виконання етапів магістерської дисертації | Примітка |
|-------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------|----------|
| 1     | Пошук матеріалу на прикладі найкращих практик                                                                                        | 12.03.2018 - 15.05.2018                          |          |
| 2     | Створення нового підходу до обрахунку основних енергетичних характеристик СК                                                         | 12.03.2018 - 15.03.2018                          |          |
| 3     | Розрахункове порівняння нового підходу з існуючими.                                                                                  | 18.03.2018 - 20.03.2018                          |          |
| 4     | Створення нового програмного забезпечення на основі отриманих дослідницьких результатів у програмному середовищі Borland C++ Builder | 25.03.2018 - 30.03.2018                          |          |
| 5     | Моделювання параболоїдного сонячного концентратора з ідеальним та реальним рефлектором у програмному середовищі Comsol               | 01.04.2018 - 03.04.2018                          |          |
| 6     | Розробка стартап проекту                                                                                                             | 07.04.2018 - 20.04.2018                          |          |
| 7     | Нормативне оформлення магістерської дисертації                                                                                       | 27.04.2018 - 15.05.2018                          |          |

**Студент**

\_\_\_\_\_ К.О. Славінська  
(підпис) (ініціали, прізвище)

**Науковий керівник дисертації**

\_\_\_\_\_ В.П. Студенець  
(підпис) (ініціали, прізвище)

## Реферат

Дана магістерська дисертація складається зі вступу, чотирьох розділів основної частини, висновків, списку використаних літературних джерел та двох додатків. Повний обсяг роботи складає 79 сторінок, включає у себе 40 рисунків, 10 таблиць, 45 формул, 29 джерел в переліку посилань та 1 презентацію.

Метою роботи є створення універсального програмного забезпечення для обрахунку основних енергетичних характеристик параболоїдних та параболоциліндричних концентраторів сонячної енергії у середовищі «Borland C++ Builder»; створення моделі існуючого параболоїдного сонячного концентратора в програмному середовищі «Comsol Multiphysics». Основним показником ефективної роботи є коефіцієнт концентрації, визначення якого базується на роботах.

**Об'єкт дослідження:** процеси енергоперетворення у параболоїдному сонячному концентраторі для СЕУ на базі двигуна Стірлінга.

**Предмет дослідження:** енергетичні характеристики ПСК на базі двигуна Стірлінга.

Опубліковані тези доповіді «Особливості моделювання сонячного параболоїдного концентратора в програмному середовищі Comsol Multiphysics» на XVI міжнародній науково-практичній конференції «Сучасні проблеми наукового забезпечення енергетики» та статтю «Розробка програмного забезпечення розрахунку основних енергетичних характеристик сонячного параболоїдного та параболоциліндричного концентратора» у науковому журналі «Енергетика: економіка, технології, екологія» (в редакції).

Ключові слова: параболічний концентратор, параболоциліндричний концентратор, відновлювальні джерела енергії, енергія Сонця, рефлектор, двигун Стірлінга, енергозбереження

## Abstract

This master's dissertation consists of an introduction, four sections of the main part, conclusions, a list of used literary sources and two applications. Full work is 79 pages, includes 40 drawings, 10 tables, 45 formulas, 29 sources in the list of references and 1 presentation.

The purpose of the work is to create a universal software for calculating the main energy characteristics of paraboloid and parabolic-cylindrical solar energy concentrators in Borland C ++ Builder environment; creation of a model of an existing paraboloid solar concentrator in Comsol Multiphysics software environment. The main indicator of effective work is the concentration coefficient, whose definition is based on the work.

**Object** of research: processes of energy conversion in a paraboloid solar concentrator for the CEY on the base of the Stirling engine.

**Subject of research:** power characteristics of the solar energy station on the basis of the Stirling engine.

The abstracts of the report "Features of modeling of the solar paraboloid concentrator in the Comsol Multiphysics software environment" at the XVI International Scientific Conference "Modern Problems of Scientific Supply of Energy" and the article "Development of Software for Calculating the Basic Energy Characteristics of a Solar Paraboloid and Parabolo-Cylindrical Hub" in the Scientific Journal "Power Engineering" : economy, technology, ecology "(in edition).

Key words: parabolic concentrator, parabolo-cylindrical concentrator, renewable energy sources, solar energy, reflector, Stirling engine, energy saving

## ЗМІСТ

|                                                                                         |    |
|-----------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Перелік умовних позначень, символів, скорочень і термінів .....                         | 6  |
| ВСТУП.....                                                                              | 7  |
| 1 ЛІТЕРАТУРНИЙ ОГЛЯД РОБІТ .....                                                        | 12 |
| 1.1 Сонячна енергетика, перспективи та напрями розвитку .....                           | 12 |
| 1.2 Досягнення сонячної енергетики у світі.....                                         | 16 |
| 1.3 Переваги та недоліки застосування сонячних концентраторів.....                      | 19 |
| 1.4 Основні типи сонячних концентраторів та їх характеристики .....                     | 21 |
| 1.5 Характеристики діючих сонячних концентраторів на базі двигуна<br>Стірлінга.....     | 26 |
| Висновки .....                                                                          | 30 |
| 2 СТВОРЕННЯ ПРОГРАМНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ .....                                              | 32 |
| 2.1 Класичні методології розрахунку сонячних концентраторів.....                        | 32 |
| 2.2 Розробка нового підходу .....                                                       | 41 |
| 2.3 Порівняння отриманих методик обрахунку .....                                        | 44 |
| 2.4 Розробка програмного забезпечення.....                                              | 47 |
| Висновки .....                                                                          | 49 |
| 3 МОДЕЛЮВАННЯ ПАРАБОЛОЇДНОГО КОНЦЕНТРАТОРА У<br>ПРОГРАМНОМУ СЕРЕДОВИЩІ COMSOL.....      | 51 |
| 3.1 Особливості роботи у програмному забезпеченні COMSOL Multiphysics ..                | 51 |
| 3.2 Опис досліджувального концентратора .....                                           | 52 |
| 3.3 Метод інтеграції для ідеально гладких концентраторів.....                           | 56 |
| 3.4 Моделювання параболоїдного сонячного концентратора з ідеальним<br>рефлектором ..... | 58 |

|                                                                                                                 |    |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 3.5 Моделювання параболоїдного сонячного концентратора з реальним рефлектором .....                             | 61 |
| 3.6 Порівняння отриманих результатів для параболоїдного концентратора з ідеальним та реальним рефлектором ..... | 63 |
| Висновки .....                                                                                                  | 64 |
| 4 СТАРТАП-ПРОЕКТ .....                                                                                          | 66 |
| 4.1 Зміст ідеї для стартап проекту .....                                                                        | 66 |
| Висновки .....                                                                                                  | 69 |
| ВИСНОВКИ.....                                                                                                   | 70 |
| СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ .....                                                                                | 71 |
| Додаток А.....                                                                                                  | 74 |
| Додаток Б.....                                                                                                  | 75 |

## Перелік умовних позначень, символів, скорочень і термінів

### Умовні позначення та символи

$R_s$  – коефіцієнт дзеркального відбиття;  
 $U_m$  – максимальний кут розкриття сонячного концентратора;  
 $E_0$  – густина потоку прямого сонячного проміння;  
 $h$  – інтегральний ступінь точності;  
 $f$  – фокусна відстань;  
 $p$  – фокальний параметр;  
 $E_r$  – опромінення у фокальній площині сонячного концентратора;  
 $E_F$  – опромінення у фокальній точці сонячного концентратора;  
 $E_{max}$  – максимальне опромінення у фокальній точці сонячного концентратора.

### Скорочення

СЕС – сонячна електростанція;  
СЕУ – сонячна енергетична установка;  
СК – сонячний концентратор;  
АЕС – атомна електростанція;  
ТЕС – теплова електростанція;  
ККД – коефіцієнт корисної дії.

### Терміни

Сонячна енергетика - використання сонячної енергії для отримання електричної або теплової енергії в будь-якому зручному для їх застосування вигляді.

Геліоустановка – установка, створення для вловлювання сонячної енергії та перетворенні її у електричну чи теплову.



## **ВСТУП**

### **Актуальність роботи**

Виснаження світових паливно-енергетичних ресурсів, постійно зростаючі потреби споживачів, що неминуче викликають підвищення цін на енергоносії, як на світовому ринку, так і в Україні, загострило проблему впровадження нетрадиційних відновлювальних джерел енергії та енергозберігаючих технологій [1].

Питання енергозбереження є актуальним як для України так, і для всього світу загалом. Ефективне та раціональне споживання енергоресурсів, впровадження енергоефективних, екологічно чистих технологій є найважливішою тематикою сьогодення [2]. Актуальність проблеми полягає в необхідності моделювання та числового розрахунку сонячного параболоїдного концентратора для розрахунку доцільності впровадження з подальшою метою отримання теплової або електричної енергії на промисловому чи споживчому рівні [3].

Сонячна енергія для досягнення поверхні Землі повинна подолати мільйони миль через вакуум простору. Після тривалої подорожі більша частина енергії відбивається назад у космос або поглинається атмосферою [4].

Частина сонячної радіації, поглиненої земною поверхнею, досягає пристроїв, які можуть використовувати цю енергію. Наприклад, параболоїдні сонячні коцентратори фокусують падаючу сонячну радіацію на невелику область (приймач). Оскільки сонячна енергія накопичується на великій ділянці, пасивний тепловий потік на приймачі надзвичайно високий. Ця область максимально концентрує сонячну енергію, яка може бути перетворена в хімічну або електричну.

Концентратори сонячної енергії набувають останнім часом все більшого значення у зв'язку з необхідністю вирішення важливих наукових та інженерних задач при створенні нової техніки та використанні сонячної енергії. Основними

характеристиками дзеркал, концентруючих пряме сонячне випромінювання є опромінення у фокальній площині  $E_f$  та максимальне опромінення  $E_{max}$  в фокусі дзеркала.

Великого успіху в області дослідження чисельних характеристик сонячних концентраторів досягнуто завдяки зусиль вчених, серед яких в першу чергу слідє назвати Р.Р. Апарісі, П. Жозе, Р.А. Західова, Ш.І. Кличева., Г.Я. Умарова, А.А. Вайнера, , Р.Ю. Акбарова та А.А. Кучкарова.

При проектуванні потужних геліоустановок виникає необхідність застосування нового програмного забезпечення для розрахунку технічних характеристик сонячних концентраторів.

У роботі представлений аналіз існуючих моделей розрахунку параметрів параболічного та параболоциліндричного концентраторів. За результатами дослідження визначено відмінності між методиками, розраховано ключові параметри, визначено відмінності між підходами. Створено математичну модель розрахунку основних характеристик для ідеального та реального концентратора сонячної енергії. Наведено відмінність та особливості розрахунку параболічних та параболоциліндричних сонячних концентраторів.

Змодельовано покроковий алгоритм обрахунку характеристик сонячного концентратора. Побудовано графік залежності максимальної опроміненості параболоїдного та параболоциліндричного сонячного концентратора від максимального кута розкриття  $U_{max}$ . У висновках визначено, що отриману програму можна застосовувати у сучасній геліотехнічній практиці, пов'язаній з проектуванням потужних геліоустановок.

У цій роботі тепловий потік, що надходить на приймач як функція радіального положення, обчислюється та порівнюється з опублікованими значеннями [5]. Розглядається ідеальна та реальна відбиваюча поверхня сонячного концентратора. Реальний рефлексор включає в себе корекції, обумовлені наявністю фокальної плями та шорсткістю поверхні відбивача.

### **Мета і завдання дослідження**

Метою роботи є створення універсального програмного забезпечення для обрахунку основних енергетичних характеристик параболоїдних та параболоциліндричних концентраторів сонячної енергії у середовищі «Borland C++ Builder»; створення моделі існуючого параболоїдного сонячного концентратора [6] в програмному середовищі «Comsol Multiphysics». Основним показником ефективної роботи є коефіцієнт концентрації, визначення якого базується на роботах [7, 8].

Відповідно до поставленої мети мають бути вирішені такі завдання:

- аналіз існуючих моделей розрахунку параметрів параболоїдного та параболоциліндричного концентраторів;
- виведення нових формул обрахунку основних енергетичних характеристик параболоїдного концентратора та порівняння результатів, отриманих за допомогою нових формул та існуючих;
- створення блок-схеми алгоритму розрахунку параметрів СК;
- моделювання сонячного параболоїдного концентратора з реальним та ідеальним відбивачам в програмному середовищі Comsol Multiphysics;
- порівняння отриманих результатів для параболоїда з реальним та ідеальним рефлектором.
- створення нового програмного забезпечення з урахуванням особливостей чисельного обрахунку сонячних концентраторів в залежності від типу (параболоїд чи параболоцилінд).

**Об'єкт дослідження:** процеси енергоперетворення у параболоїдному сонячному концентраторі для СЕУ на базі двигуна Стірлінга.

**Предмет дослідження:** енергетичні характеристики ПСК на базі двигуна Стірлінга.

## **Методи дослідження**

Відомі методи визначення основних енергетичних характеристик сонячних концентраторів максимально наближені до реальних умов, комп'ютерне моделювання, програмування.

## **Наукова новизна одержаних результатів**

- отримано нові формули розрахунку основних енергетичних характеристик параболоїдного СК;
- визначено залежність максимальної опроміненості у фокальній точці при зміні кута розкриття, за характеристиками певного СК;
- проведено комп'ютерне моделювання роботи параболоїдного СК на базі двигуна Стірлінга з використанням програмного забезпечення Comsol;
- створено нову програму універсального характеру, завдяки якій можливо розрахувати енергетичні параметри параболоїдного та параболоциліндричного сонячних концентраторів.

## **Практичне значення одержаних результатів**

Робота має практичне значення при проектуванні сонячних енергетичних установок промислового чи споживчого характеру. Результати, які отримані у даній роботі, допоможуть визначити техніко-економічну доцільність впровадження сонячних концентраторів, а також можуть бути використані для підвищення енергетичної ефективності створюваних сонячних енергетичних установок на базі двигуна Стірлінга.

## **Особистий внесок магістра**

Магістерська робота є результатом чисельного дослідження концентратора сонячної енергії. Створене програмне забезпечення доцільно використовувати при проектуванні нового або реконструкції існуючого сонячного концентратора параболоїдної чи параболоциліндричної форми.

### **Апробація результатів дисертації**

Результати дослідження доповідались у X міжнародній науково-практичній конференції «Енергетика. Екологія. Людина», 26-27 квітня 2018 р.

### **Публікації**

Опубліковані тези доповіді «Особливості моделювання сонячного параболоїдного концентратора в програмному середовищі Comsol Multiphysics» на XVI міжнародній науково-практичній конференції «Сучасні проблеми наукового забезпечення енергетики» та статтю «Розробка програмного забезпечення розрахунку основних енергетичних характеристик сонячного параболоїдного та параболоциліндричного концентратора» у науковому журналі «Енергетика: економіка, технології, екологія» (в редакції).

### **Структура і обсяг дисертаційної роботи**

Дана магістерська дисертація складається зі вступу, чотирьох розділів основної частини, висновків, списку використаних літературних джерел та двох додатків. Повний обсяг роботи складає 79 сторінок, включає у себе 40 рисунків, 10 таблиць, 45 формул, 29 джерел в переліку посилань та 1 презентацію.

# 1 ЛІТЕРАТУРНИЙ ОГЛЯД РОБІТ

## 1.1 Сонячна енергетика, перспективи та напрями розвитку

Сонце є найбільш потужним та перспективним з поновлювальних джерел енергії. Його потенційні можливості на поверхні Землі в сотні разів перевищують існуючий середній рівень енергоспоживання [9].

Дослідження в області використання сонячної енергії в найбільш розвинених країнах (США, Японія, Німеччина) проводяться на рівні національних програм, розрахованих на довгостроковий період.

До переваг застосування сонячних концентраторів відносять порівняно невеликий об'єм інвестицій і короткий термін будівництва, що дозволяє прискорити отримання прибутку, забезпечити мінімальну дію на довкілля, надійність і близькість до споживача.

Сумарні світові інвестиції в сонячну енергетику в 2016 році склали близько \$30 млрд. За останні роки в Україні з'явилося кілька десятків невеликих сонячних станцій потужністю від 1 до 20 МВт. У 2016 році було введено 120,6 МВт потужностей об'єктів відновлюваної електроенергетики (в 4 рази більше, ніж в 2015-му). З них 99,1 МВт - це саме сонячні електростанції [10]. На рисунку 1.1 зображено графік динаміки потужності у МВт сонячних електростанцій в Україні за 2011-2017 рр.

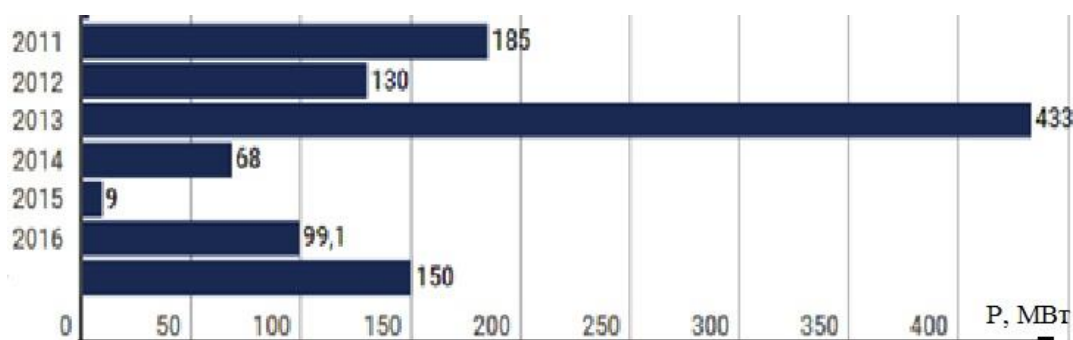


Рисунок 1.1 – Динаміка потужності сонячних електростанцій в Україні у період 2011-2017 рр.

Сегмент сонячної енергетики представлений в основному численними невеликими підприємствами. Найбільшою корпорацією сонячних станцій в Україні є «CNBM New Energy Engineering Co».

Німецька компанія «Global Green Energy» збирається будувати в Сумській області сонячну станцію потужністю 50 МВт. У Дніпропетровській області компанія «Мейн Груп Україна» в кінці 2017 року почала реалізовувати сонячний проект потужністю 10 МВт із загальним обсягом інвестицій 11 млн. євро. Під станцію відведено ділянку площею 15 га на території Нікопольського феросплавного заводу. Планується, що дана СЕС увійде в ТОП-3 найбільших у Європі. Відпуск «зеленої» електроенергії Нікопольської СЕС складе понад 280 млн. кВт-год на рік.

У січні 2018 було виділено 3 млн. євро від уряду Словенії для створення СЕС у Житомирській обл. Це дозволить побудувати 10 МВт сонячну електростанцію. Окупність в цьому випадку становить приблизно 3-3,5 роки. Щороку бюджет міста може отримувати за рахунок сонця 1,6 млн євро. У 2018 році в Херсонській області планується побудувати ще одну сонячну електростанцію на 30 МВт.

Інтерес до України проявляють нові зарубіжні інвестори. Так, нещодавно норвезька компанія «Scatec Solar» оголосила про плани запуснути в Україні дві сонячні станції потужністю 60 МВт.

Україна має значний потенціал використання сонячних ресурсів (головним чином у південних регіонах). Це обумовлено географічним положенням України. Річні теплонадходження та потенціал сонячної енергії України зображено на рисунку 1.2.

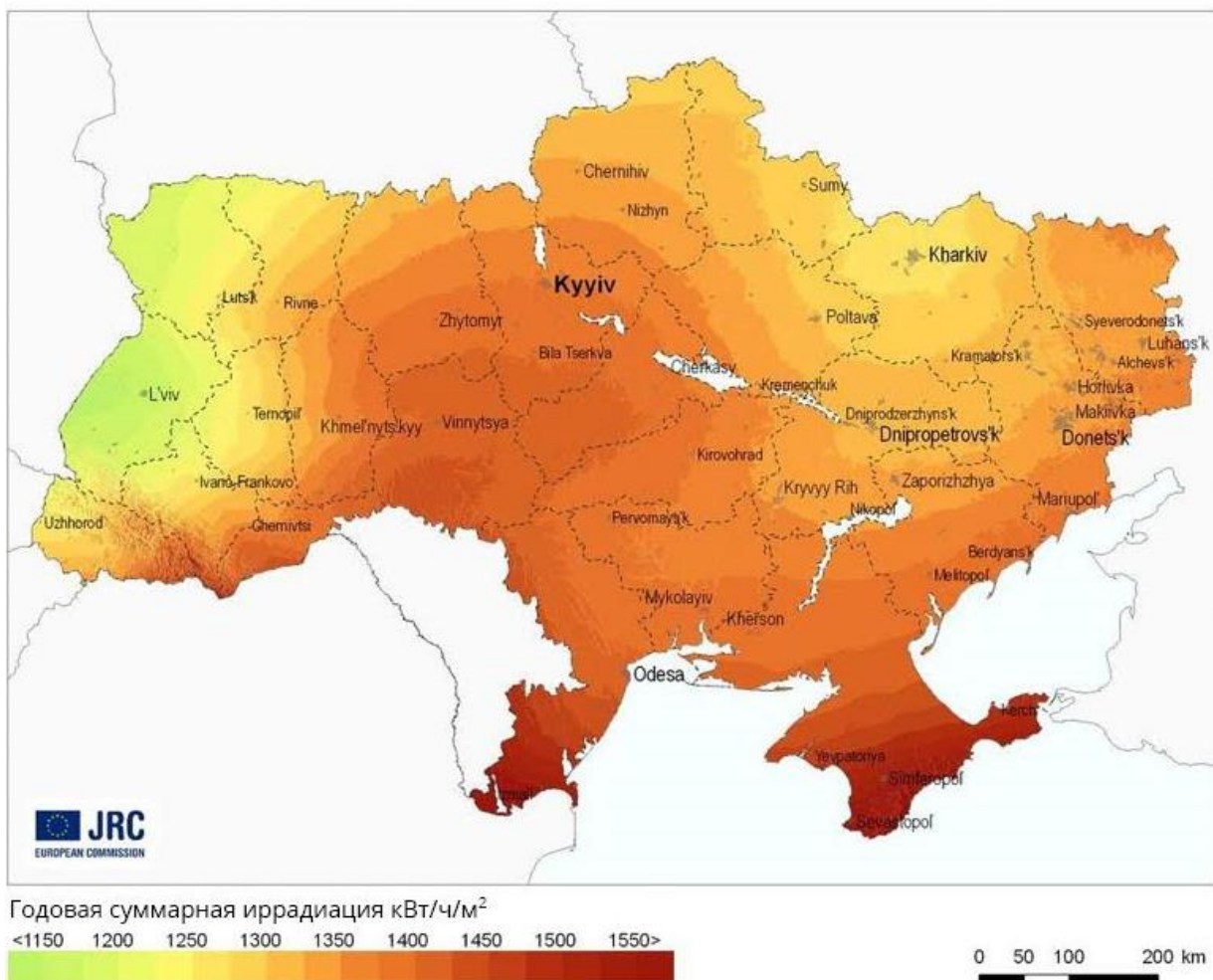


Рисунок 1.2 – Річні теплонадходження та потенціал сонячної енергії України

Першою людиною, яка практично використала сонячну енергію, був Архімед, який за допомогою винайдених ним деяких оптичних пристроїв зумів зібрати сонячні промені в потужний пучок і спалити римський флот[11].

Винайдений пристрій представляв собою перший концентратор сонячного випромінювання. У фокусі цього концентратора температура могла досягати 300 - 400 ° С.

Сонячний концентратор приймає сонячні промені і збирає їх в єдиний енергетичний пучок. Скористатися отриманою енергією можна різними шляхами – нагрівати воду, причому, кількість нагрітої води буде визначатися розмірами і конструкцією концентратора. Невеликі параболічні пристрої можна використовувати в якості сонячної печі для приготування їжі(рисунок 1.3).





Рисунок 1.3 – Домашнє застосування сонячного концентратора

Сучасні геліотехнічні установки можна умовно розділити на дві великі групи. В першу групу входять установки (середньо- та високотемпературні), в яких до приймача або перетворювача попередньо проводиться підвід сконцентрованої сонячної енергії. В установках другого типу (водонагрівачі, опріснювачі) не використовуються концентруючі елементи [12].

Отже, створення потужних сонячних установок, призначених для задоволення промислових потреб, пов'язано з розвитком геліотехнічних засобів, віднесених до першої групи. Мова йде переважно про великі сонячні печі промислового призначення та про сонячні енергетичні станції (модульного типу) для отримання електроенергії у кількостях, достатніх для національного рівня.

## 1.2 Досягнення сонячної енергетики у світі

Популярність сонячної енергетики росте з кожним роком по всьому світі. Це пов'язано не тільки з дешевизною та екологічністю, а ще і з тим, що розвиток даної галузі енергетики активно підтримується зі сторони державної влади. За даними Міжнародного енергетичного агентства, найбільший приріст потужності сонячних електростанцій за 2017 р. спостерігається зі сторони Китаю [10]. На рисунку 1.4 зображено темп розвитку сонячної енергетики у світі за період 2000-2017 рр.

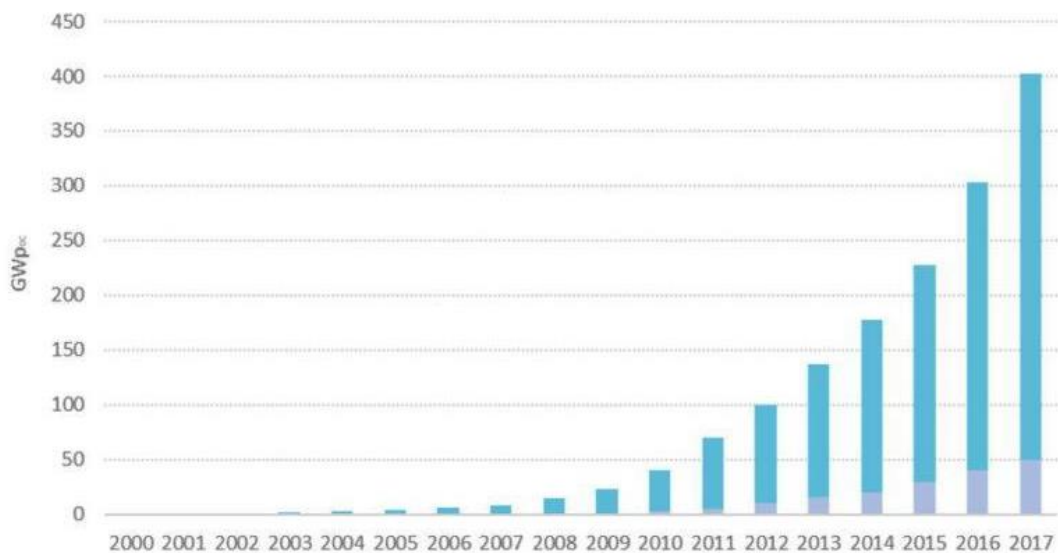


Рисунок 1.4 – Темп розвитку сонячної енергетики у світі 2000-2017 рр.

У 2017 році було введено в експлуатацію 98 ГВт сонячних електростанцій, а їх сумарна встановлена потужність досягла 402,5 ГВт. Це в 70 разів більше ніж у 2006 році. За показником встановленої потужності сонячна енергетика обійшла атомну [10]. У таблиці 1.1 наведено першу десятку країн по встановленій потужності сонячної енергетики у 2016 р. та 2017 р.

Таблиця 1.1 – Рейтинг країн світу по встановленій потужності сонячної енергетики у 2016 р. та 2017 р.

| 2016 рік |                 |                             | 2017 рік |                 |                             |
|----------|-----------------|-----------------------------|----------|-----------------|-----------------------------|
| Країна   |                 | Встановлена потужність, ГВт | Країна   |                 | Встановлена потужність, ГВт |
| 1        | Китай           | 53                          | 1        | Китай           | 131                         |
| 2        | США             | 10,6                        | 2        | США             | 51                          |
| 3        | Індія           | 9,1                         | 3        | Японія          | 49                          |
| 4        | Японія          | 7                           | 4        | Німеччина       | 42                          |
| 5        | Туреччина       | 2,6                         | 5        | Італія          | 19,7                        |
| 6        | Німеччина       | 1,8                         | 6        | Індія           | 18,3                        |
| 7        | Австралія       | 1,25                        | 7        | Велика Британія | 12,7                        |
| 8        | Корея           | 1,2                         | 8        | Франція         | 8                           |
| 9        | Велика Британія | 0,9                         | 9        | Австралія       | 7,2                         |
| 10       | Бразилія        | 0,9                         | 10       | Іспанія         | 5,6                         |

На даний момент найпотужнішою сонячною електростанцією є «Toraz Solar Farm» в Каліфорнії з потужністю 1096 ГВт (рисунок 1.5). Станція налічує 9 мільйонів сонячних панелей і може забезпечувати електроенергією більше 160 000 будинків та потужних підприємств [13].



Рисунок 1.5 – Сонячна електростанція «Toraz Solar Farm»

Другою за потужністю виступає сонячна електростанція «Aqua Caliente» в Аризоні з потужністю 626 ГВт (рисунок 1.6). Сонячні панелі являють собою тонку плівку, яка є дешевшою за кристалічний кремній. Відмінністю даної СЕС є те, що на панелях відсутні датчики відслідковування Сонця, а сонячну енергію тут збирають за рахунок величезної кількості панелей [13].



Рисунок 1.6 – Сонячна електростанція «Aqua Caliente»

Окрім «Aqua Caliente», в Аризоні є ще «Mesquite» з потужністю 414 ГВт. Завдяки 800 000 сонячним панелям СЕС забезпечує електроенергією близько 260 000 будинків [13].

У самій гарячій точці Китаю, в провінції Цинхай розташований гідроенергетичний сонячний парк «Хуанхе» з потужністю 317 ГВт (рисунок 1.7).





Рисунок 1.7 - Гідроенергетичний сонячний парк «Хуанхе»

### **1.3 Переваги та недоліки застосування сонячних концентраторів**

Концентратори сонячної енергії можуть експлуатуватися до 30 років без істотних витрат на заміну обладнання. Інвестиційні витрати на впровадження сонячних електростанцій мають значні відмінності між промислово розвиненими і країнами, що розвиваються. В країнах, що розвиваються, наприклад, у зв'язку з низькою вартістю робочої сили витрати на загальнобудівельні роботи істотно менше, ніж у промислово розвинених країнах. При умовно рівній вартості обладнання і монтажних робіт будівництво сонячної електростанції в країнах, що розвиваються може бути економічно більш виправданим, ніж в розвинених країнах [14].

Сонячні концентратори можуть вирішувати такі фотоелектричні задачі [15]:

- підвищують ККД перетворення опромінення сонячними елементами;
- підвищують ККД перетворення за рахунок комбінованого одночасного використання електроенергії та теплової енергії.

До абсолютних переваг застосування сонячних концентраторів можна віднести:

- екологічність – при процесі перетворення енергії сонця в теплову чи електричну в навколишнє середовище не здійснюються жодні шкідливі викиди;
- економічність – отримана електроенергія буде коштувати в рази дешевше ніж вироблена на АЕС;
- доцільне використання в регіонах з підвищеними теплонадходженнями та з доступними великими площами (наприклад, пустелі).

Основний недолік сонячного концентратора полягає в тому, що він повинен бути постійно орієнтований на Сонце. У промислових гелієвих установках застосовуються спеціальні системи спостереження, які повертають дзеркала або рефрактори слідом за рухом Сонця, забезпечуючи тим самим прийом і концентрацію максимальної кількості сонячної енергії. Для індивідуального використання навряд чи буде доцільним застосовувати подібні датчики, так як їх вартість може значно перевищувати вартість простого відбивача на звичайній тринозі.

До недоліків використання сонячних концентраторів також можна віднести те, що:

- сонячні концентратори займають велику площу, відповідно, в деяких регіонах побудова потужної СЕС не буде можливою;
- необхідно проводити регулярну очистку поверхні для забезпечення високого рівня відбивання сонячних променів;
- при певних природних умовах (дощ, град тощо) є велика вірогідність пошкодження поверхні сонячного концентратора, що спричинить необхідність заміни рефлектора;

- існує певна сезонність у надходженнях сонячної радіації, яка призводить до того, що в деяких регіонах сонячна енергетика розглядається як резервна генеруюча потужність;
- залежність від погоди (хмарність, дощ, сніг). Чим менше сонячного випромінювання – тим менш ефективно працює концентратор.

#### **1.4 Основні типи сонячних концентраторів та їх характеристики**

На сьогоднішній день існує цілий ряд типів сонячних концентраторів. Вони відрізняються перш за все своєю геометричною формою і, в наслідок, оптичними характеристиками. Відповідно продуктивність і доцільність використання теж буде різною. До основних типів сонячних концентраторів відносяться: параболоїдний, параболоциліндричний, люмінесцентний, призматичний, фокони та фокліни.

Форма параболоїдного концентратора утворена обертом параболи навколо осі симетрії [4]. Найголовнішою властивістю параболоїда є те, що всі промені сходяться в одну точку фокуса. Парабола відноситься до категорії найпродуктивніших сонячних концентраторів, концентрація опромінення може перевищити  $10^4$ .

На рисунку 1.8 зображено схему роботи сонячного концентратора: сонячне випромінювання потрапляє на дзеркальний рефлектор у вигляді «тарілки», звідки відбивається і потрапляє на приймач, яким може виступати двигун Стірлінга.

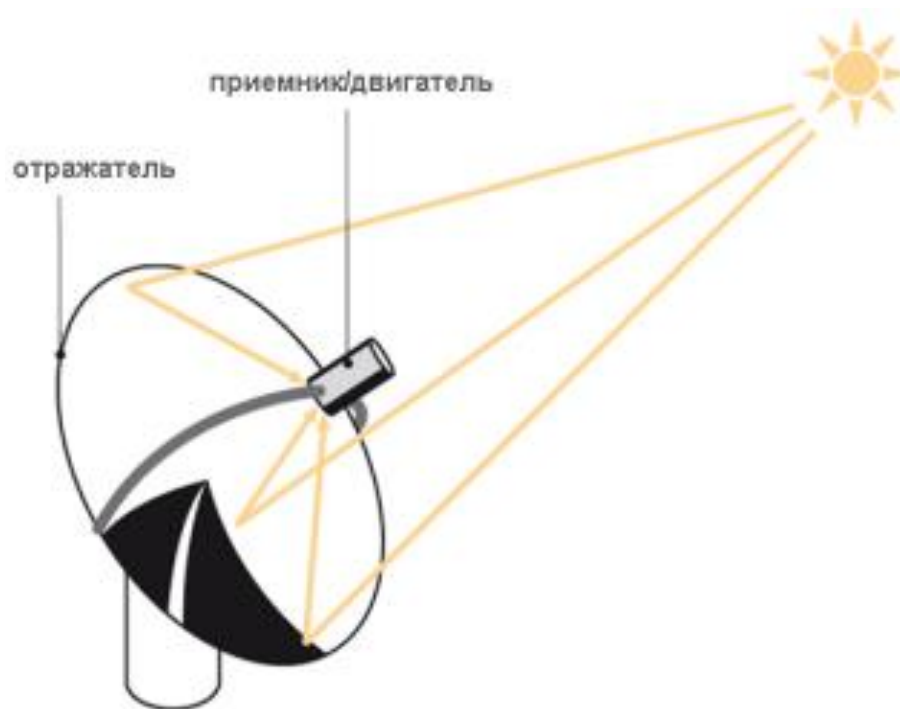


Рисунок 1.8 – Конструктивна схема роботи параболоїдного сонячного концентратора

Параболоциліндричний концентратор забезпечує невисоку в порівнянні з параболоїдним концентрацію сонячної енергії. Отримана концентрація дозволяє отримувати на опромінених поверхнях теплові напруги, достатні для роботи низько- та середньотемпературних приймачів [9].

Зовнішній вигляд параболоциліндричного сонячного концентратора зображено на рисунку 1.9.

Три основні складові параболоциліндричного СК – каркас разом з опорами (1), теплоприймач (2) та рефлектор (3). Приймач теплової енергії повинен бути розташований вздовж всієї довжини рефлектора. Також додатково може бути встановлено систему відслідковування сонячної радіації: відбивач буде обертатись в залежності від положення Сонця таким чином, щоб досягати найбільш можливої концентрації випромінювання. Таке доповнення широко розповсюджене в сонячній енергетиці і його доцільно застосовувати також для інших типів геліоустановок.



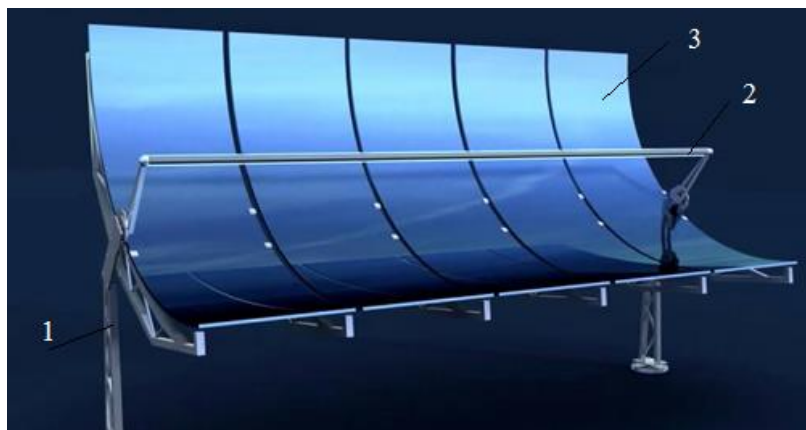


Рисунок 1.9 – Конструкція сонячного параболоциліндричного концентратора

В електростанціях з параболоциліндричними концентраторами (рисунок 1.10), СК встановлюються паралельно один одному і повертаються в слід за Сонцем. У фокусі розташована вакуумна трубка, в якій знаходиться абсорбер з селективним покриттям, де і відбувається 80-кратна концентрація сонячного випромінювання. В середині трубки протікає термомасляний теплоносіє, температура якого може сягати 400 градусів. Через теплообмінник теплова енергія передається на парові турбіни, в яких потім виробляється електроенергія [16].

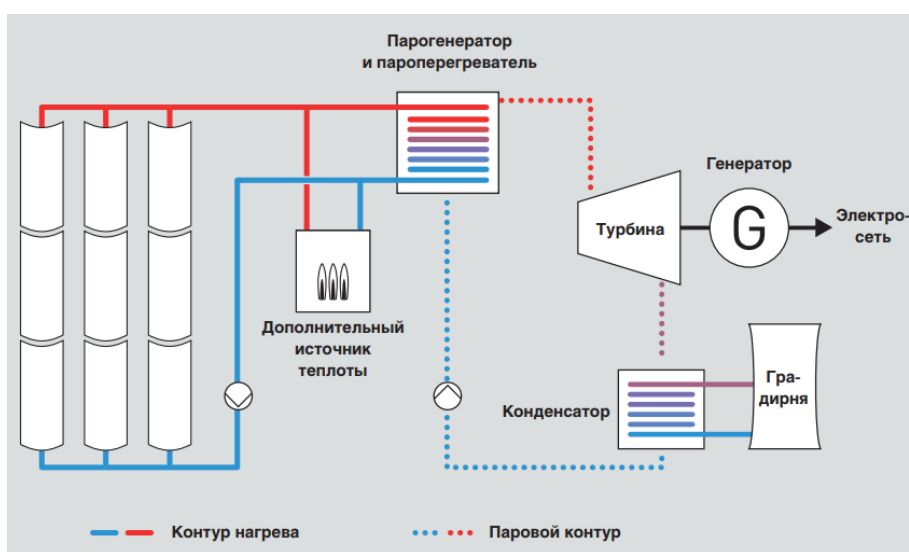


Рисунок 1.10 – Схема роботи електростанції на базі параболоциліндричних концентраторів сонячної енергії

Люмінесцентні концентратори будуються по принципу поглинання і в подальшому випромінювання частини сонячного спектру [15]. Зазвичай такі концентратори являють собою пластину з прозорого матеріалу з додатками люмінесцентних речовин. Надлишок радіації частково виходить за межі пластини, а промені з перевищенням кута повного внутрішнього поглинання починають розповсюджуватись по пластині до її країв, де створюється підвищена концентрація випромінювання (рисунок 1.11).



Рисунок 1.11 – Схема роботи люмінесцентного концентратора

При проходженні світла по люмінесцентному концентраторі мають місце ефекти: самопоглинання барвника, розсіювання, втрати при повному внутрішньому відбитті, поглинання. Всі перераховані втрати складають 1-3 % на см. Для виготовлення люмінесцентних сонячних концентраторів використовують полімерні матеріали, які поглинають приблизно 20% сонячного випромінювання.

Використання люмінесцентних пластин в якості перетворювача поля опромінення може знайти практичне застосування зі значним покращенням параметрів модуля і збільшенням рівномірності розповсюдження опромінення на фотоприймачі.

Призматичні концентратори (призмокони) являють собою в поперечному перерізі призму, де передня грань виступає приймачем теплової енергії, а задня грань з відбиваючою поверхнею, розташована під кутом до передньої. Третя поверхня виступає пунктом виходу концентрованого випромінювання [15].

Принцип роботи заключається в тому, що випромінювання падає на передню грань під кутом  $i$ , заломлюючись, відбивається від задньої грані і приходить на передню грань.

Відмінності фоконів і фоклінів від інших типів сонячних концентраторів [15]:

- довготривала робота в межах параметричного кута концентратора без слідкування за положенням Сонця;
- можливість використання певної частини розсіяного випромінювання навколо сонячного диску.

Отже, значною перевагою використання фоклінів та фоконів є те, що вони здатні «вловлювати» не тільки пряме сонячне випромінювання, а і розсіяне. Поле захоплення сонячної енергії фоконом зображено на рисунку 1.12.

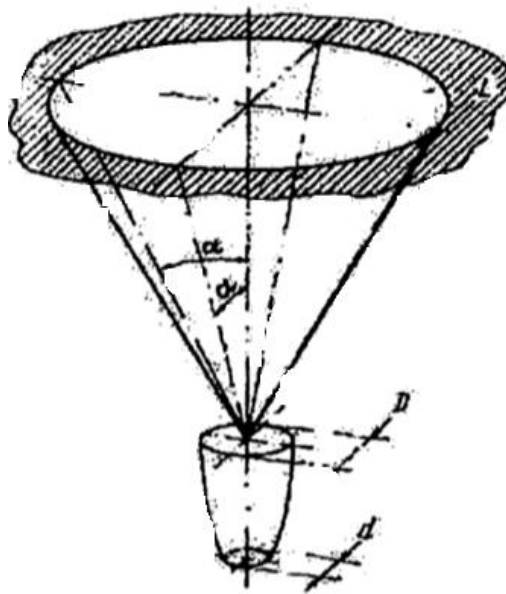


Рисунок 1.12 – Поле захоплення сонячної енергії фоконом

Концентратори цього типу ефективно можуть бути використані як другорядні відбивачі, які збільшують концентрацію сонячного потоку від первинного дзеркала.

### **1.5 Характеристики діючих сонячних концентраторів на базі двигуна Стірлінга**

Двигун Стірлінга можна назвати тепловим двигуном з зовнішнім підводом теплоти. Принцип роботи полягає у тому, що незмінна кількість робочої речовини циркулює між двома камерами із різними температурами, де по черзі нагрівається та охолоджується (рисунок 1.13). В наслідок цього, змінюється тиск робочої речовини, який і рухає робочі поршні[6].

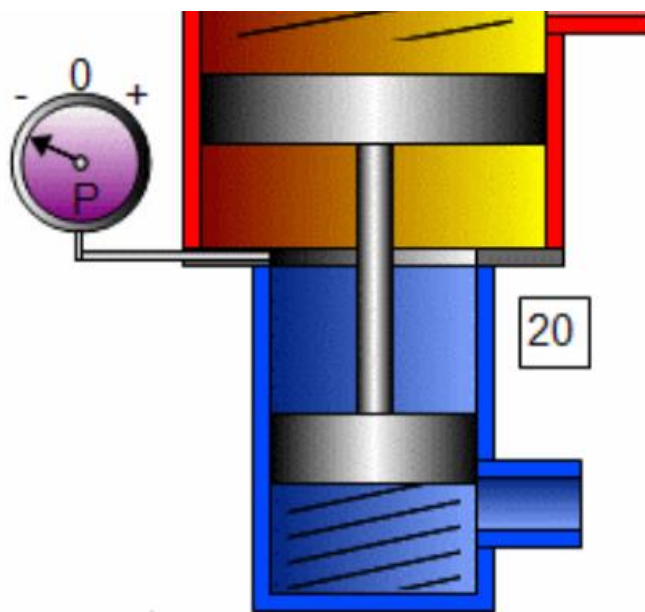


Рисунок 1.13 – Принципова схема роботи двигуна Стірлінга

До переваг двигуна Стірлінга можна віднести відносно високий ККД (45%), надійність конструкції, простоту експлуатації, відсутність шуму і т.д.

Якщо у фокусі параболічного дзеркала помістити відповідний по потужності двигун Стірлінга, то можна отримати невеликусонячну електростанцію (рисунок 1.14).

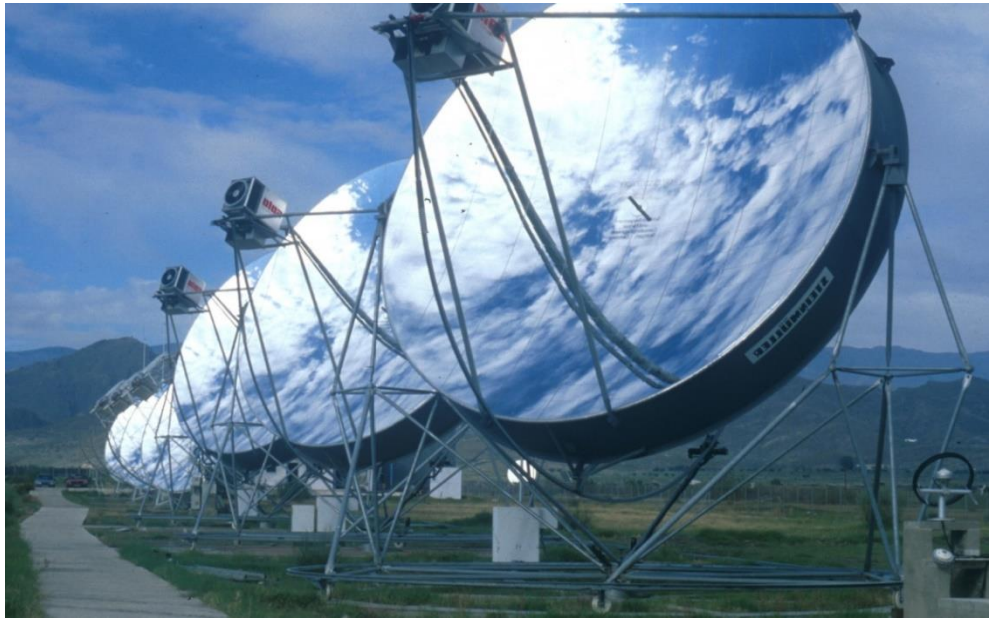


Рисунок 1.14 – Сонячна енергетична установка на базі двигуна Стірлінга

Двигун Стірлінга також доцільно застосовувати для фацетних концентраторів сонячної енергії (рисунок 1.15).



Рисунок 1.15 – Фаценті концентратори сонячної енергії на базі двигуна Стірлінга

Фірма «Qnergy» розробила і пустила в серію двигуни Стірлінга QB-3500, які призначені для роботи з сонячними концентраторами. По суті, правильніше було б їх назвати генераторами електричного струму на базі двигунів Стірлінга. Цей агрегат виробляє електричний струм потужністю 3500 Вт. На виході інвертора - стандартна напруга 220 вольт 50 герц. Цього цілком достатньо, щоб забезпечити електрикою будинок для сім'ї з 4 осіб, дачу [11]. Є ще потужніший двигун Стірлінга, випущений цією ж компанією. Технічні характеристики двигунів QB-3500 та QB-7500 наведено в таблиці 1.2.

До речі, використовуючи принцип роботи двигунів Стірлінга, людськими руками роблять пристрої, в яких використовується обертальний або зворотно-поступальний рух. Наприклад, водяні насоси для дачі.

Таблиця 1.2 – Технічні характеристики двигуна Стірлінга QEnergy QB-3500 та QB-7500

| Модель                  | QB-3500                                         | QB-7500                                                |
|-------------------------|-------------------------------------------------|--------------------------------------------------------|
| Тип                     | Вільнопоршневий                                 | Вільнопоршневий                                        |
| Вихідна потужність, кВт | 3,5                                             | 7,5                                                    |
| Вихідна напруга, В      | 420                                             | 420                                                    |
| Вихід з інвертора       | 380В або 220В/110В<br>50/60 Гц                  | 380В або 220В/110В<br>50/60 Гц                         |
| Робоче тіло             | Гелій 99,9%                                     | Гелій 99,9%                                            |
| Термін роботи, год      | 50000                                           | 50000                                                  |
| Вага, кг                | 67                                              | 103                                                    |
| Технічне обслуговування | Не потребується                                 | Не потребується                                        |
| Застосування            | Приватні будинки, мікро<br>ТЕЦ, сонячна енергія | Комерційні об'єкти,<br>мікро ТЕЦ на біопаливі,<br>газі |

До потужних сонячних електростанцій на базі двигуна Стірлінга можна віднести 10 кВт станцію в Франції, 10 кВт станцію в Іспанії, 50 кВт станцію в Саудівській Аравії.



Стация на базі двигуна Стірлінга в Саудівській Аравії була створена в 1986 році і досі залишається найбільшою сонячною електростанцією такого типу. Вона складалась з двох СЕУ потужністю 50 кВт кожен (рисунок 1.16) і проіснувала до середини 90-х років [17].



Рисунок 1.16 – Найбільша 50 кВт СЕУ на базі двигуна Стірлінга, Саудівська Аравія

Найбільшої популяризації зазнали сонячні енергетичні установки з двигуном Стірлінга на 10 кВт (Франція, Іспанія, Італія, Індія) [18]. Характеристики СЕУ на 50 кВт та 10 кВт наведено в таблиці 1.3. Зовнішній вигляд СЕУ на 10 кВт на рисунку 1.17.



Рисунок 1.17 – типова 10 кВт СЕУ на базі двигуна Стірлінга

Таблиця 1.3 – Технічні характеристики СЕУ на базі двигуна Стірлінга

| Параметр                         | СЕУ 50 кВт               | СЕУ 10 кВт                      |
|----------------------------------|--------------------------|---------------------------------|
| Діаметр,м                        | 17                       | 8,5                             |
| Середній коефіцієнт концентрації | 600                      | 2400                            |
| Площа рефлектора, м <sup>2</sup> | 227                      | 57                              |
| Двигун                           | United Stirling 4-275    | SOLO Stirling 161               |
| Тип двигуна                      | 4-циліндровий, подвійний | 2 циліндра 90 ° V,<br>одинарний |
| Система управління               | Автоматизована           | Через інтернет                  |
| Робочий газ                      | Гідроген                 | Гелій                           |

## Висновки

1. Скорочення світових паливно-енергетичних ресурсів, постійно зростаючі потреби споживачів, підвищення цін на енергоносії, загострило проблему впровадження нетрадиційних відновлювальних джерел енергії та енергозберігаючих технологій.



2. Велика кількість іноземних інвесторів зараз підтримує створення в Україні сонячних електростанцій. Це обумовлено вигідним географічним положенням та кліматом. Побудова нових СЕС заплановано у Житомирській, Дніпропетровській, Сумській та Херсонській областях [10].

3. У 2013 році Україна перебувала на піку розвитку сонячної енергетики. З 2014 року спостерігається спад активності. Це обумовлено анексією Криму, в якому була розташована основна частина СЕС України [10].

4. Світові тенденції спрямовані на розвиток сонячних ферм на основі концентраторів різних геометричних форм. Широко розповсюджені параболоциліндричні СК. Перспективним є напрямок розробки параболоїдних СК на базі двигуна Стірлінга та впровадження їх для забезпечення енергетичних потреб на промисловому рівні.

5. Перевагами параболоїдного СК на базі двигуна Стірлінга є: високий ККД, простота експлуатації, максимальний ступінь концентрації сонячного випромінювання, довгий термін експлуатації, відсутність необхідності постійного регулювання та обслуговування, можливість повної автоматизації, короткий термін окупності.

6. Основними недоліками параболоїдних СК є габаритність, складність транспортування, необхідність значних земельних площ для встановлення.

7. Для подальшого розвитку даної теми необхідно поставити наступні задачі: провести аналіз існуючих методик розрахунку основних енергетичних характеристик; розробити новий підхід розрахунку СК; створити нове програмне забезпечення універсального характеру; змодельовати сонячний параболоїдний концентратор у програмному середовищі Comsol Multiphysics; провести порівняння отриманих результатів для реального та ідеального рефлектора; розробити стартап проект.

## 2 СТВОРЕННЯ ПРОГРАМНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ

### 2.1 Класичні методології розрахунку сонячних концентраторів

На кожен елементарну площадку рефлектора падає від Сонця пучок променів, які відбиваються від цієї площадки таким чином, що у відбитому пучку енергія розсіюється за законом Гаусса [19]:

$$E = \frac{E_0 h}{\sqrt{\pi}} e^{-h^2 \varphi^2}, \quad (2.1)$$

де  $E_0$  – густина потоку прямого сонячного проміння, Вт/м<sup>2</sup>;

$h$  – інтегральний ступінь точності, град<sup>-1</sup>.

Всі промені з напрямком  $\varphi$ , відбиваються від цієї елементарної площадки, створюють елементарний пучок віддзеркалювання. Це означає, що елементарна площадка дзеркала може мати будь-які відхилення від правильної геометричної поверхні, і ці відхилення підпорядковуються закону імовірності.

Проведено аналіз густини теплового потоку в фокальному зображенні сонячного концентратора з урахуванням нерівномірності густини випромінювання сонячного диску. Густина випромінювання видимого диску Сонця нерівномірна. Вона досягає найбільшого значення в центрі і рівномірно зменшується до краю [20].

Відносно значення густини потоку, Вт/м<sup>2</sup> на різних відстанях від центру сонячного диску :

$$I = \frac{1 + 1,5641 \cos \beta}{2,5641} I_0, \quad (2.2)$$

де  $I_0$  – інтенсивність випромінювання в центрі Сонця, Вт/м<sup>2</sup>;

$\beta$  – інтегральний кут Сонця, град.

На рисунку 2.1 зображено видимий сонячний диск, де  $R_0$  – радіус видимого диску Сонця.

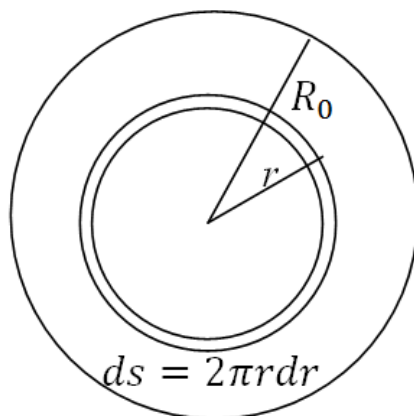


Рисунок 2.1 – Видимий сонячний диск

Значення  $R_0$  залежить від розміру зображення. Так як:

$$\cos \beta = \frac{\sqrt{R_0^2 - r^2}}{R_0}, \quad (2.3)$$

то рівняння (2.2) можна записати у вигляді:

$$I = \frac{R_0 + 1,5641\sqrt{R_0^2 - r^2}}{2,5641R_0} I_0. \quad (2.4)$$

Значення  $I_0$  можна визначити у вигляді функції  $R_0$  і сонячної сталої  $p_0 = 1,94 \frac{\text{кал}}{\text{см}^2 \text{хв}}$ . Обчислення зроблені при ККД 100%.  $R_0$  – радіус сонячного зображення, утвореного на площині, нормальній до осі конуса відбиття від ділянки поверхні параболоїдного відбивача з проекцією рівною  $1 \text{ см}^2$ . Потік, падаючий на це кругле зображення, дорівнює, відповідно,  $1,94 \text{ кал/хв}$ .

Таким чином, отримаємо:

$$E = 1,94 \frac{\text{кал}}{\text{XB}} = \int_0^{P_0} I ds = 2\pi \int_0^{r_0} I r dr, \quad (2.5)$$

де  $ds = 2\pi r dr$  – елемент ділянки концентричного кільця (рисунок 2.1).

Узагальнена математична модель забезпечує реалізацію етапів розрахунку та проектування з урахуванням енергетичних характеристик джерела випромінювання, неточності відбиваючих поверхонь та інше.

У роботі [21] представлено формулу для розрахунку максимальної концентруючої спроможності параболоциліндричних дзеркал ідеальної системи:

$$E_{m(i)}^{\Pi\Pi} = 298,6 \cdot E_0 \cdot R_s \cdot \sin U_m, \quad (2.6)$$

де  $R_s$  – коефіцієнт дзеркального відбиття;

$U_m$  – максимальний кут розкриття сонячного концентратора, град.

Розрахункову схему визначення опроміненості параболоциліндричного концентратора зображено на рисунку 2.2 [12].

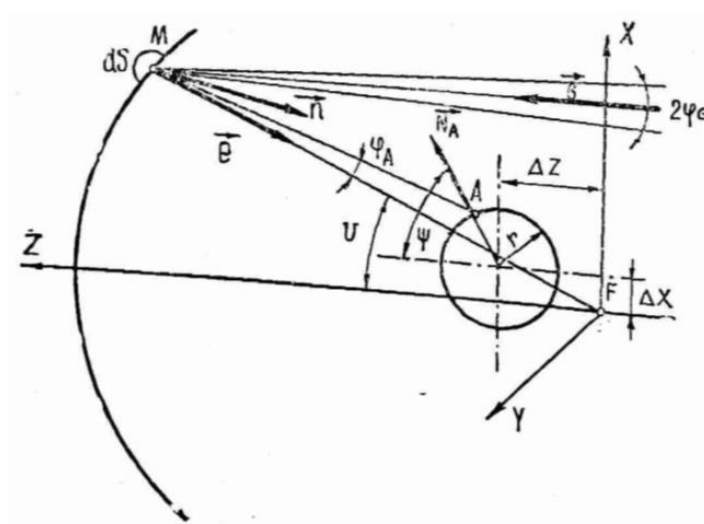


Рисунок 2.2 – Розрахунок розподілу опроміненості по приймачу  
параболоциліндричного концентратора

Спираючись на вищезгадане визначення, Акбаров Р.Ю. у своїй праці [21] виводить формулу для розрахунку максимальної концентруючої спроможності параболоциліндричних дзеркал реальної системи:

$$E_{m(p)}^{\text{пц}} = 298,6 \cdot E_0 \cdot R_s \cdot \sin U_m \cdot K, \quad (2.7)$$

де  $K$  – коректуючий коефіцієнт, що враховує неідеальність концентруючої системи.

В данному дослідженні за вихідний пункт приймається формула Р.Р. Апарісі [19] для визначення опромінення у фокальній точці сонячного концентратора:

$$E_F = 8,36 \cdot 10^3 \cdot E_0 \cdot R_s \cdot A_m \cdot h^2, \quad (2.8)$$

де  $A_m$  – функція, що враховує геометричні особливості відбивача.

Для параболоїдних відбивачів:

$$A_m = \frac{\pi}{6} [\sqrt{2}(2 - \cos U_m) \sqrt{1 + \cos U_m} - 2]. \quad (2.9)$$

Для параболоциліндричних відбивачів:

$$A_m = b \cdot \frac{\sqrt{2}}{3} \cdot (\cos U_m + 2) \sqrt{1 - \cos U_m}, \quad (2.10)$$

де  $b$  – піввісь елементарного еліпса, що визначається за формулою:

$$b = p \cdot \varphi / (1 + \cos U_m), \quad (2.11)$$

де  $p$  – фокальний параметр (м), що визначається, виходячи з геометричної форми сонячного концентратора. Для рефлекторів параболоциліндричної та параболоїдної форм обчислюється:

$$p = 2f, \quad (2.12)$$

де  $f$  – фокальна довжина, м.

Як видно, формула Р.Р.Апарісі має універсальний характер і може бути використана для розрахунку параболоциліндричних та параболічних концентраторів.

На рисунку 2.3 зображено концентричну систему, яка збирає випромінювання в точці F в межах тілесного кута [4].

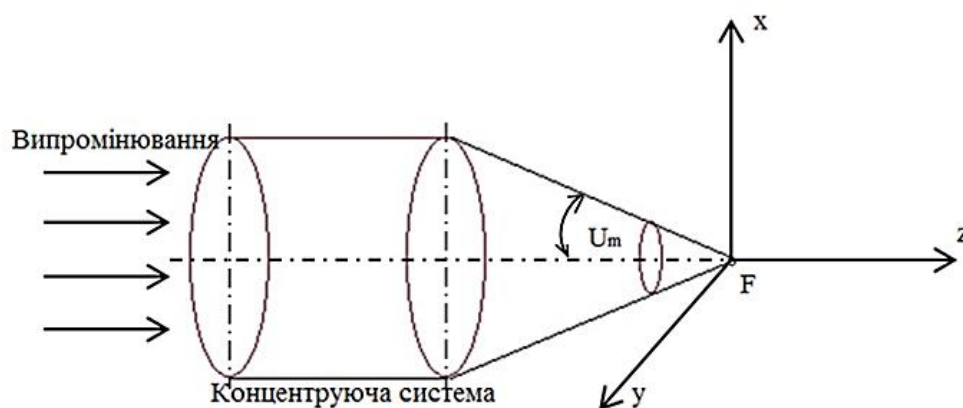


Рисунок 2.3 – Схема для розрахунку фокальної опроміненості

Опромінення у фокальній точці виражається інтегралом [4]:

$$E_F = \int B(\vec{dw}) dw_z, \quad (2.13)$$

де  $B(\vec{dw})$  – енергетична яскравість у напрямку  $\vec{dw}$ ;

$\vec{dw}$  – елементарний вектор тілесного кута;

$dw_z$  – проекція  $\overrightarrow{dw}$  на оптичну вісь  $z$ .

Якщо яскравість постійна в межах тілесного кута, система симетрична та відсутнє затемнення, то опромінення в фокальній точці [4]:

$$E_F = \pi \cdot B \cdot \sin^2 U_m. \quad (2.14)$$

Енергетична яскравість у напрямку елементарного тілесного кута [22]:

$$B = 1,255 \cdot B_{\text{ср}} \cdot \frac{(1 + 1,5641 \cdot \sqrt{1 - \left(\frac{\varphi}{\varphi_0}\right)^2})}{2,5641}. \quad (2.15)$$

З іншого боку розподіл яскравості по сонячному диску можна представити у вигляді[4]:

$$B = R_s \cdot B_0. \quad (2.16)$$

В земних умовах яскравість сонячного диску у центрі в 1,2 рази перевищує середню яскравість [4]:

$$B_0 = 1,2 \cdot B_{\text{ср}}. \quad (2.17)$$

Середня яскравість сонячного диска [4]:

$$B_{\text{ср}} = \frac{E_0}{\pi \cdot \varphi_0^2}, \quad (2.18)$$

де  $\varphi_0$  – кут розкриття елементарного конічного пучка, рад. Кутовий радіус Сонця становить 0,004654 рад.

Сонячне проміння падає на земну поверхню під тілесним кутом невеликої величини. Густина сонячного потоку відносно невелика. Схема концентрації сонячного випромінювання завдяки параболічному рефлектору зображено на рисунку 2.4.

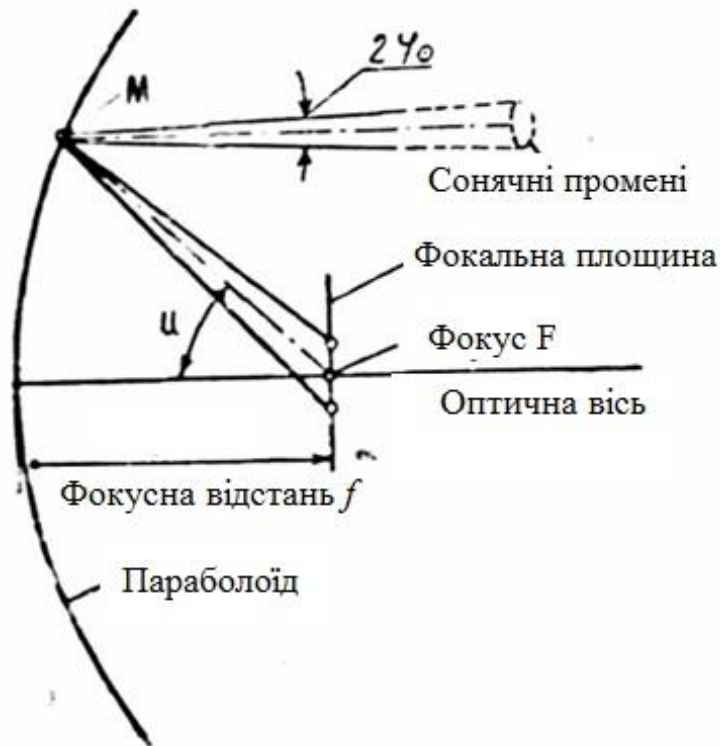


Рисунок 2.4 - Схема концентрації сонячного випромінювання

Таким чином, опромінення в фокусі ідеального параболоїдного концентратора [4]:

$$E_F^{id} = \frac{1,2}{\varphi_0^2} \cdot E_0 \cdot R_s \cdot \sin^2 U_m. \quad (2.19)$$

Інтегральний параметр точності ідеальної системи:

$$(h_1^{id})^2 = \frac{1,2}{\varphi_0^2} = (236)^2. \quad (2.20)$$



З урахуванням (2.20), формула (2.19) прийме вигляд:

$$E_{F(i)}^{\Pi} = (h_1^{\text{ід}})^2 \cdot E_0 \cdot R_s \cdot \sin^2 U_m = (236)^2 \cdot E_0 \cdot R_s \cdot \sin^2 U_m. \quad (2.21)$$

Опромінення в фокусі реального параболоїдного концентратора відповідно:

$$E_{F(p)}^{\Pi} = h_1^2 \cdot E_0 \cdot R_s \cdot \sin^2 U_m. \quad (2.22)$$

При чому у фокусі реальної концентруючої системи опромінення буде менше ( $E_F^p < E_F^{\text{ід}}$ ), так як не всі точки апертури направляють промені в фокус. Реальна апертура виявиться меншою ніж в ідеальному випадку. Однак частіше цей ефект трактується інакше: апертура вважається такою ж, а зменшення опромінення пов'язано зі зменшенням яскравості джерела [4].

Необхідно враховувати, що  $h_1 < h_1^{\text{ід}}$ . Коефіцієнт  $h_1$  пов'язаний з неідеальністю концентруючої системи,  $\varphi_0$  та  $B_0$ . При фіксованій відстані від Сонця, параметр  $h_1$  характеризує ідеальність сонячної концентруючої системи і може бути прийнятим за інтегральний ступінь точності. Інтегральний ступінь точності визначається:

$$h_1 = h \cdot \frac{180}{\pi}. \quad (2.23)$$

В свою чергу коефіцієнт  $h$  визначається за графіком, представленим на рисунок 2.5 [19].

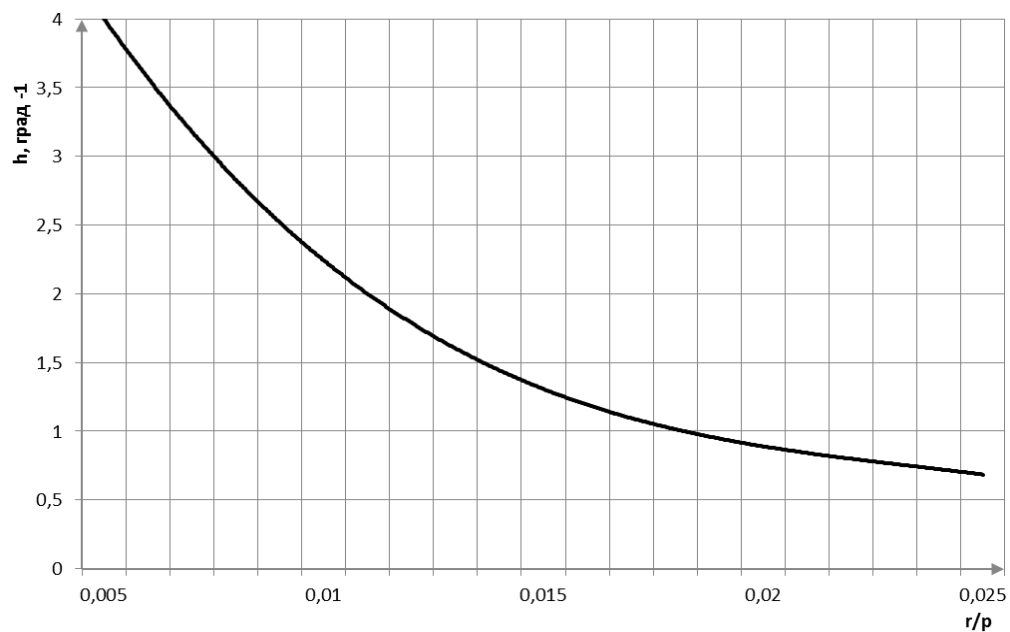


Рисунок 2.5 – Залежність коефіцієнту інтегральної точності  $h$  від радіусу фокального зображення  $r/p$

Розрахункова схема зображена на рисунку 2.6 [4].

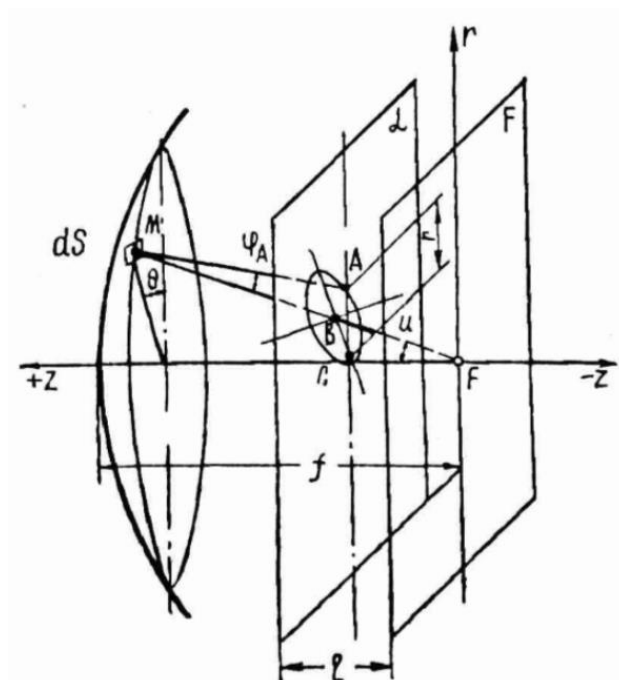


Рисунок 2.6 – Розрахункова схема

Нехай досліджувана точка  $A$  лежить на площині  $L$ , віддаленій від фокальної на відстань  $l$ , та розрахована від оптичної вісі на відстані  $r$ . Точка  $M$ , оточена площадкою  $dS$ , створює в точці  $A$  певний променевий вектор.

Радіус-вектор на фокальній площині, відстань від фокуса [19]:

$$r = \rho \cdot \sin \varphi, \quad (2.24)$$

де  $\rho$  – відстань від фокусу до певної точки кривої визначається з рівняння конічного перерізу [4]:

$$\rho = \frac{p}{1 + \cos U_m}. \quad (2.25)$$

Так як  $\sin \varphi \approx \varphi$ , то відповідно  $r = \rho \cdot \varphi$ .

Необхідно відмітити, що основною відмінністю, яку необхідно враховувати при обрахунках  $E_{f(p)}$  та  $E_{f(i)}$  є коефіцієнт  $h_1$ , який при визначенні опромінення в фокусі реального відбивача розраховується з формули (2.23), а при розрахунку ідеального відбивача приймається сталою величиною і дорівнює 236.

Таким чином, опромінення в фокусі реального параболоциліндричного концентратора:

$$E_{f(p)}^{\text{пц}} = 8,36 \cdot 10^3 \cdot E_0 \cdot R_s \cdot A_m \cdot h^2. \quad (2.26)$$

## 2.2 Розробка нового підходу

З іншого боку, опромінення в фокусі ідеального параболоциліндричного концентратора можна розрахувати:

$$\begin{aligned} E_{f(i)}^{\text{пц}} &= 8,36 \cdot 10^3 \cdot E_0 \cdot R_s \cdot A_m \cdot h_1^{\text{ід}} = 8,36 \cdot 10^3 \cdot E_0 \cdot R_s \cdot A_m \cdot 4,12^2 \cdot \left(\frac{180}{\pi}\right)^2 = \\ &= 8,36 \cdot 10^3 \cdot E_0 \cdot R_s \cdot A_m \cdot (236)^2. \end{aligned} \quad (2.27)$$

З урахуванням того, що формули (2.8) та (2.27) відображують однакову величину і є тотожними, можна відслідкувати залежність:

$$8,36 \cdot 10^3 \cdot E_0 \cdot R_s \cdot A_m \cdot h^2 = E_0 \cdot R_s \cdot \sin^2 U_m \cdot \left( h \cdot \frac{180}{\pi} \right)^2,$$

$$8,36 \cdot 10^3 \cdot A_m = \sin^2 U_m \cdot \left( \frac{180}{\pi} \right)^2,$$

$$A_m = 0,39 \cdot \sin^2 U_m, \quad (2.28)$$

або

$$\sin U_m = \sqrt{\frac{A_m}{0,39}}. \quad (2.29)$$

Необхідно зазначити, що дану залежність між  $A_m$  та  $\sin U_m$  доцільно використовувати тільки у випадку параболоїдного концентратора.

Підставивши (2.28) в (2.8), відома формула Р.Р. Апарісі прийме вигляд:

$$E_{F(p)}^{\Pi} = 3,26 \cdot 10^3 \cdot E_0 \cdot R_s \cdot \sin^2 U_m \cdot h^2. \quad (2.30)$$

Отримана формула (2.30) дає змогу розрахувати  $E_{F(i)}^{\Pi}$  без додаткового розрахунку коефіцієнта  $A_m$ .

Підставивши (2.29) в (2.27) отримаємо:

$$E_{F(p)}^{\Pi} = h_1^2 \cdot E_0 \cdot R_s \cdot \frac{A_m}{0,39}. \quad (2.31)$$

Опромінення в фокусі ідеального параболоїдного концентратора з формул (2.30) та (2.31) відповідно:

$$E_{F(i)}^{\Pi} = 3,26 \cdot 10^3 \cdot E_0 \cdot R_s \cdot \sin^2 U_m \cdot h_{\text{ід}}^2, \quad (2.32)$$

$$E_{F(i)}^{\Pi} = h_{\text{ід}}^2 \cdot E_0 \cdot R_s \cdot \frac{A_m}{0,39}. \quad (2.33)$$

Максимальну концентруючу спроможність ідеального параболічного сонячного концентратора можна визначити за формулами:

$$E_{m(i)}^{\Pi} = E_0 \cdot R_s \cdot \sin^2 U_m \cdot \left(\frac{180}{\pi}\right)^2, \quad (2.34)$$

$$E_{m(i)}^{\Pi} = 8,36 \cdot 10^3 \cdot E_0 \cdot R_s \cdot A_m, \quad (2.35)$$

$$E_{m(i)}^{\Pi} = 3,26 \cdot 10^3 \cdot E_0 \cdot R_s \cdot \sin^2 U_m, \quad (2.36)$$

$$E_{m(i)}^{\Pi} = E_0 \cdot R_s \cdot \frac{A_m}{0,39} \cdot \left(\frac{180}{\pi}\right)^2. \quad (2.37)$$

Для обрахунку максимальної концентруючої спроможності реального параболічного сонячного концентратора, необхідно формули (2.34) – (2.37) домножити на коректуючий коефіцієнт  $K$ . У результаті чого отримаємо:

$$E_{m(p)}^{\Pi} = E_0 \cdot R_s \cdot \sin^2 U_m \cdot \left(\frac{180}{\pi}\right)^2 \cdot K, \quad (2.38)$$

$$E_{m(p)}^{\Pi} = 8,36 \cdot 10^3 \cdot E_0 \cdot R_s \cdot A_m \cdot K, \quad (2.39)$$

$$E_{m(p)}^{\Pi} = 3,26 \cdot 10^3 \cdot E_0 \cdot R_s \cdot \sin^2 U_m \cdot K, \quad (2.40)$$

$$E_{m(p)}^{\Pi} = E_0 \cdot R_s \cdot \frac{A_m}{0,39} \cdot \left(\frac{180}{\pi}\right)^2 \cdot K. \quad (2.41)$$

Опромінення в фокусі параболоциліндричного концентратора з ідеальним та реальним рефлектором можна вивести з формули (2.8):

$$E_{F(i)}^{\Pi\Pi} = 8,36 \cdot 10^3 \cdot E_0 \cdot R_s \cdot A_m \cdot h_{\text{ід}}^2 \cdot \left(\frac{\pi}{180}\right)^2, \quad (2.42)$$

$$E_{F(p)}^{\Pi\Pi} = 8,36 \cdot 10^3 \cdot E_0 \cdot R_s \cdot A_m \cdot h^2. \quad (2.43)$$

Розподіл опроміненості на фокальній площині концентратора [4]:

$$E_r = E_F \cdot e^{-cr^2}. \quad (2.44)$$

Ця формула може бути застосована у відношенні параболоциліндричного та параболічного концентратора.

Коефіцієнт в показнику визначається [4]:

$$c = 3,283 \cdot 10^3 \cdot h_1^2 \left( \frac{1 + \cos U_m}{p} \right)^2. \quad (2.45)$$

## 2.3 Порівняння отриманих методик обрахунку

Для зручності користування вищезазначені формули розрахунку основних енергетичних характеристик занесено в табл. 2.1 та 2.2 для параболоїдного та параболоциліндричного концентраторів відповідно.

Для підтвердження правильності виведених формул, в таблиці 2.3 надано розрахункове порівняння нових формул з існуючими формулами Р.Р. Апарісі та Р.А. Західова.

Таблиця 2.1 – Формули розрахунку основних енергетичних характеристик сонячного параболоциліндричного концентратора

|                                             | Параболоциліндричний сонячний концентратор                                                                            |                                                                           |
|---------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------|
|                                             | Ідеальний рефлектор                                                                                                   | Реальний рефлектор                                                        |
| Максимальна концентруюча спроможність $E_m$ | $E_{m(i)}^{пц} = 298,6 \cdot E_0 \cdot R_s \cdot \sin U_m$                                                            | $E_{m(p)}^{пц} = 298,6 \cdot E_0 \cdot R_s \cdot \sin U_m \cdot K$        |
| Опромінення в фокальній точці $E_F$         | $E_{F(i)}^{пц} = 8,36 \cdot 10^3 \cdot E_0 \cdot R_s \cdot A_m \cdot h_{ид}^2 \cdot \left( \frac{\pi}{180} \right)^2$ | $E_{F(p)}^{пц} = 8,36 \cdot 10^3 \cdot E_0 \cdot R_s \cdot A_m \cdot h^2$ |
| Опромінення на фокальній площині $E_r$      | $E_r = E_F \cdot e^{-cr^2}$                                                                                           |                                                                           |

Таблиця 2.2 – Формули розрахунку основних енергетичних характеристик сонячного параболоїдного концентратора

|                                             | Параболоїдний сонячний концентратор                                                                              |                                                                                                  |
|---------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------|
|                                             | Ідеальний рефлектор                                                                                              | Реальний рефлектор                                                                               |
| Максимальна концентруюча спроможність $E_m$ | $E_{m(i)}^n = E_0 \cdot R_s \cdot \sin^2 U_m \cdot \left(\frac{180}{\pi}\right)^2$                               | $E_{m(p)}^n = E_0 \cdot R_s \cdot \sin^2 U_m \cdot \left(\frac{180}{\pi}\right)^2 \cdot K$       |
|                                             | $E_{m(i)}^n = 8,36 \cdot 10^3 \cdot E_0 \cdot R_s \cdot A_m$                                                     | $E_{m(p)}^n = 8,36 \cdot 10^3 \cdot E_0 \cdot R_s \cdot A_m \cdot K$                             |
|                                             | $E_{m(i)}^n = 3,26 \cdot 10^3 \cdot E_0 \cdot R_s \cdot \sin^2 U_m$                                              | $E_{m(p)}^n = 3,26 \cdot 10^3 \cdot E_0 \cdot R_s \cdot \sin^2 U_m \cdot K$                      |
|                                             | $E_{m(i)}^n = E_0 \cdot R_s \cdot \frac{A_m}{0,39} \cdot \left(\frac{180}{\pi}\right)^2$                         | $E_{m(i)}^n = E_0 \cdot R_s \cdot \frac{A_m}{0,39} \cdot \left(\frac{180}{\pi}\right)^2 \cdot K$ |
| Опромінення в фокальній точці $E_F$         | $E_{F(i)}^n = E_0 \cdot R_s \cdot \sin^2 U_m \cdot h_{id}^2$                                                     | $E_{F(p)}^n = E_0 \cdot R_s \cdot \sin^2 U_m \cdot h_1^2$                                        |
|                                             | $E_{F(i)}^n = 8,36 \cdot 10^3 \cdot E_0 \cdot R_s \cdot A_m \cdot h_{id}^2 \cdot \left(\frac{\pi}{180}\right)^2$ | $E_{F(p)}^n = 8,36 \cdot 10^3 \cdot E_0 \cdot R_s \cdot A_m \cdot h^2$                           |
|                                             | $E_{F(i)}^n = 3,26 \cdot 10^3 \cdot E_0 \cdot R_s \cdot \sin^2 U_m \cdot h_{id}^2$                               | $E_{F(p)}^n = 3,26 \cdot 10^3 \cdot E_0 \cdot R_s \cdot \sin^2 U_m \cdot h^2$                    |
|                                             | $E_{F(i)}^n = h_{id}^2 \cdot E_0 \cdot R_s \cdot \frac{A_m}{0,39}$                                               | $E_{F(p)}^n = h_1^2 \cdot E_0 \cdot R_s \cdot \frac{A_m}{0,39}$                                  |
| Опромінення на фокальній площині $E_r$      | $E_r = E_F \cdot e^{-cr^2}$                                                                                      |                                                                                                  |

Таблиця 2.3 – Порівняння методик розрахунку основних енергетичних характеристик сонячних параболоїдних концентраторів (ПСК)

|                                                                                              | ПСК №1            | ПСК №2            | ПСК №3            |
|----------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------|-------------------|-------------------|
| Фокальний параметр $p$ , м                                                                   | 10,72             | 1,694             | 1,2               |
| Інтегральний параметр точності $h$ , град <sup>-1</sup>                                      | 0,9               | 4                 | 2,08              |
| Максимальний кут розкриття концентратора $U_{max}$ , град                                    | 49,7              | 61,87             | 64                |
| Падаюча радіація $E_0$ , Вт/м <sup>2</sup>                                                   | 814               | 814               | 814               |
| Коефіцієнт відбиття $R_s$                                                                    | 0,8               | 0,8               | 0,8               |
| Геометричний коефіцієнт $A_{max}$                                                            | 0,24              | 0,33              | 0,34              |
| Опромінення в фокусі реального відбивача за формулою (2.8) Р.Р. Апарісі, Вт/м <sup>2</sup>   | $1,05 \cdot 10^6$ | $2,84 \cdot 10^7$ | $8,12 \cdot 10^6$ |
| Опромінення в фокусі реального відбивача за формулою (2.27) Р.А. Західова, Вт/м <sup>2</sup> | $1,01 \cdot 10^6$ | $2,66 \cdot 10^7$ | $8,01 \cdot 10^6$ |
| Опромінення в фокусі реального відбивача за новою формулою (2.30), Вт/м <sup>2</sup>         | $1,00 \cdot 10^6$ | $2,64 \cdot 10^7$ | $8,00 \cdot 10^6$ |
| Опромінення в фокусі реального відбивача за новою формулою (2.31), Вт/м <sup>2</sup>         | $1,06 \cdot 10^6$ | $2,86 \cdot 10^7$ | $8,07 \cdot 10^6$ |

З отриманих результатів очевидно, що застосування спрощених формул (2.30) та (2.31) є доцільним.

Нижче приведено максимальні опроміненості, отримані у фокальній точці параболоїдного (рисунок 2.7) та параболоциліндричного (рисунок 2.8) сонячного концентратора.

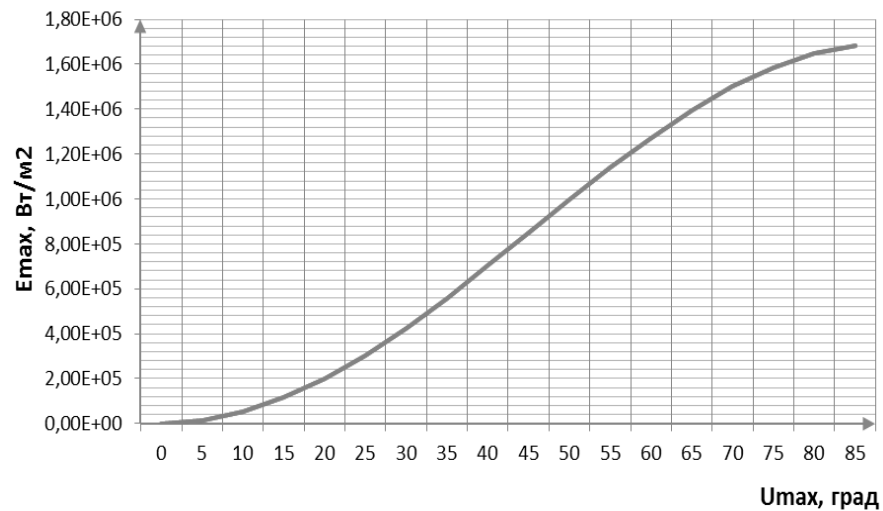


Рисунок 2.7 – Максимальна опроміненість параболоїдного сонячного концентратора в залежності від максимального кута розкриття  $U_{max}$

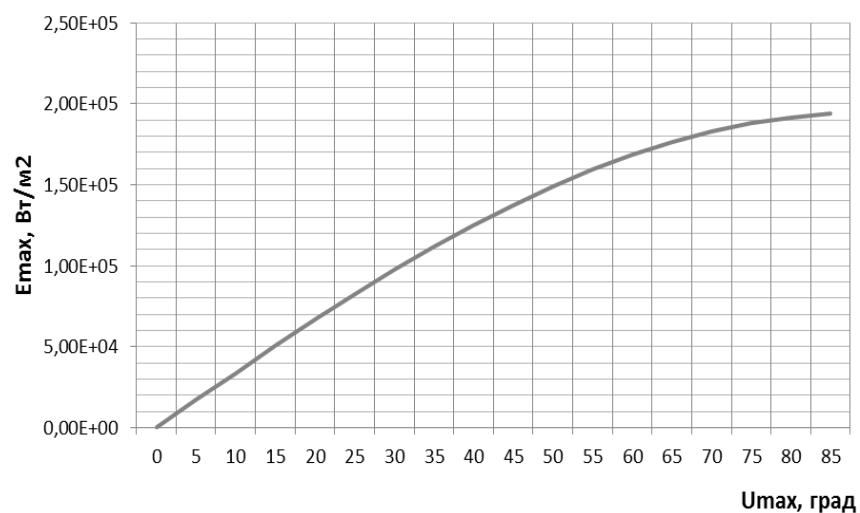


Рисунок 2.8 – Максимальна опроміненість параболоциліндричного сонячного концентратора в залежності від максимального кута розкриття  $U_{max}$



## 2.4 Розробка програмного забезпечення

Розроблено програму розрахунку на основі вищенаведених математичних співвідношень, яку доцільно використовувати при проектуванні та експлуатації сонячних параболоїдних та параболоциліндричних концентраторів. Блок-схема програми представлена на рисунк 2.9.

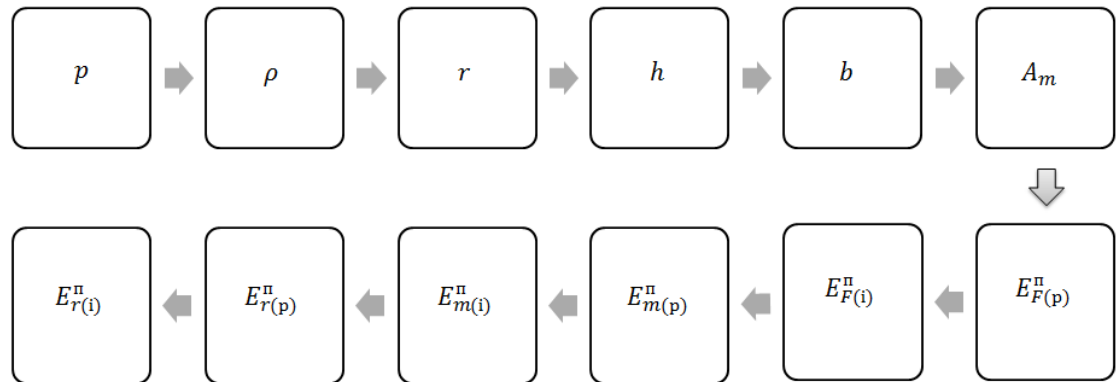


Рисунок 2.9 – Блок-схема алгоритма розрахунку основних енергетичних характеристик концентратора сонячної енергії

Інтерфейс створеної програми для розрахунку енергетичних характеристик параболоїдного та параболоциліндричного сонячного концентратора зображено на рисунк 2.11 та рисунк 2.12 відповідно.

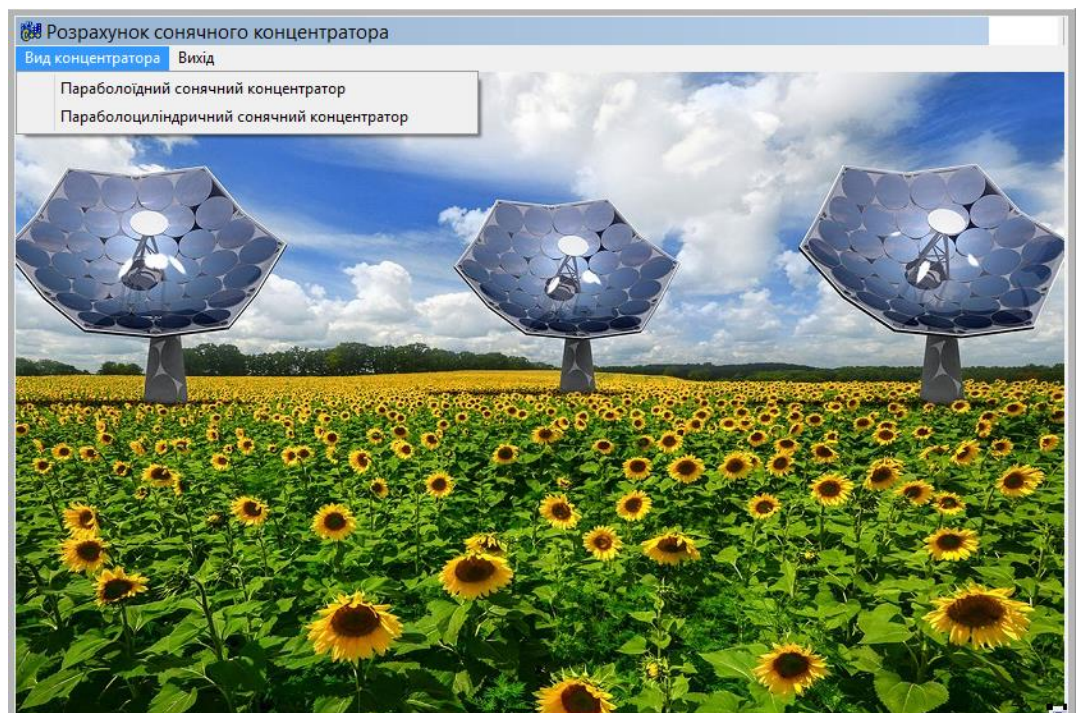


Рисунок 2.10 – Перша сторінка програми

Параболоїдний сонячний концентратор

| Вхідні дані                                |     | Реальний відбивач                                                               | Ідеальний відбивач |
|--------------------------------------------|-----|---------------------------------------------------------------------------------|--------------------|
| Фокусна відстань $f$ , м                   | 0,6 | Опромінення в фокусі відбивача $E_f$ , Вт/м <sup>2</sup>                        | 8078716            |
| Кут розкриття $U_{\max}$ , град.           | 64  | Максимальна концентруюча спроможність відбивача $E_m$ , Вт/м <sup>2</sup>       | 1371204,75         |
| Коефіцієнт відбиття $R_s$                  | 0,8 | Розподіл опроміненості на фокальній площині відбивача $E_f$ , Вт/м <sup>2</sup> | 80709,1484375      |
| Падаюча радіація $E_0$ , Вт/м <sup>2</sup> | 814 |                                                                                 | 290222,4375        |
| Коректуючий коефіцієнт, $K$                | 0,8 |                                                                                 |                    |

Розрахунок      Назад

Рисунок 2.11 – Програма розрахунку параболоїдного сонячного концентратора

Параболоциліндричний сонячний концентратор

| Вхідні дані                                |     | Реальний відбивач                                                               | Ідеальний відбивач |               |
|--------------------------------------------|-----|---------------------------------------------------------------------------------|--------------------|---------------|
| Фокусна відстань $f$ , м                   | 0,4 | Опромінення в фокусі відбивача $E_f$ , Вт/м <sup>2</sup>                        | 98146,96875        | 1109613       |
| Кут розкриття $U_{\max}$ , град.           | 67  | Максимальна концентруюча спроможність відбивача $E_m$ , Вт/м <sup>2</sup>       | 1406943            | 1758678,625   |
| Коефіцієнт відбиття $R_s$                  | 0,8 | Розподіл опроміненості на фокальній площині відбивача $E_f$ , Вт/м <sup>2</sup> | 5502,2954101562    | 62206,8984375 |
| Падаюча радіація $E_0$ , Вт/м <sup>2</sup> | 800 |                                                                                 |                    |               |
| Коректуючий коефіцієнт, $K$                | 0,8 |                                                                                 |                    |               |

Розрахунок      Назад

Рисунок 2.12 – Програма розрахунку параболоциліндричного сонячного концентратора

Вхідними параметрами є: фокусна відстань, максимальний кут розкриття, коефіцієнт відбиття, падаюча радіація, коректуючий коефіцієнт.

Програмне забезпечення розроблене за допомогою мови програмування «Borland C++ Builder»

## Висновки

1. Проведено дослідження різних методик визначення основних енергетичних характеристик сонячних концентраторів.
2. Запропоновано новий підхід розрахунку параболоїдного концентратора.
3. Перевірено правильність і доцільність використання нового підходу. Проведено порівняльний аналіз результатів отриманих класичними формулами та новими.
4. Здійснено порівняння енергетичних характеристик для реального та ідеального рефлектора.

5. Розроблено універсальну програму, зрозумілу в користуванні, яку доцільно використовувати при проектуванні і експлуатації сонячних концентраторів параболоїдної та параболоциліндричної геометричної форми.

### **3 МОДЕЛЮВАННЯ ПАРАБОЛОЇДНОГО КОНЦЕНТРАТОРА У ПРОГРАМНОМУ СЕРЕДОВИЩІ COMSOL**

#### **3.1 Особливості роботи у програмному забезпеченні COMSOL Multiphysics**

Моделювання в широкому сенсі є основним методом досліджень у всіх областях знань і науково обґрунтованим методом оцінок характеристик складних систем, що використовуються для прийняття рішень в різних сферах інженерної діяльності. В даний час не можна назвати область людської діяльності, в якій би не використовувалися методи моделювання[24].

Виходячи із вищесказаного пропонується змоделювати процес розповсюдження сонячних променів на відбиваючу поверхню параболоїдного концентратора.

COMSOL Group розробляє програмні рішення для мультифізичного моделювання. В саму програму Comsol Multiphysics вбудовано велику кількість модулів, завдяки яким можна змоделювати будь-який фізичний процес. Таким чином, за допомогою програми можна вирішувати питання в області електрики, механіки, оптики, хімічної інженерії тощо. Програма дає можливість оцінити доцільність впровадження певного технічного засобу, простежити його ефективність і т.д. [24].

Крім програмного забезпечення, Comsol включає в себе: бази даних, онлайн-посібник, веб-сайт, інженерний підручник та інше. На рисунку 3.1 зображено зовнішній вигляд програми COMSOL.

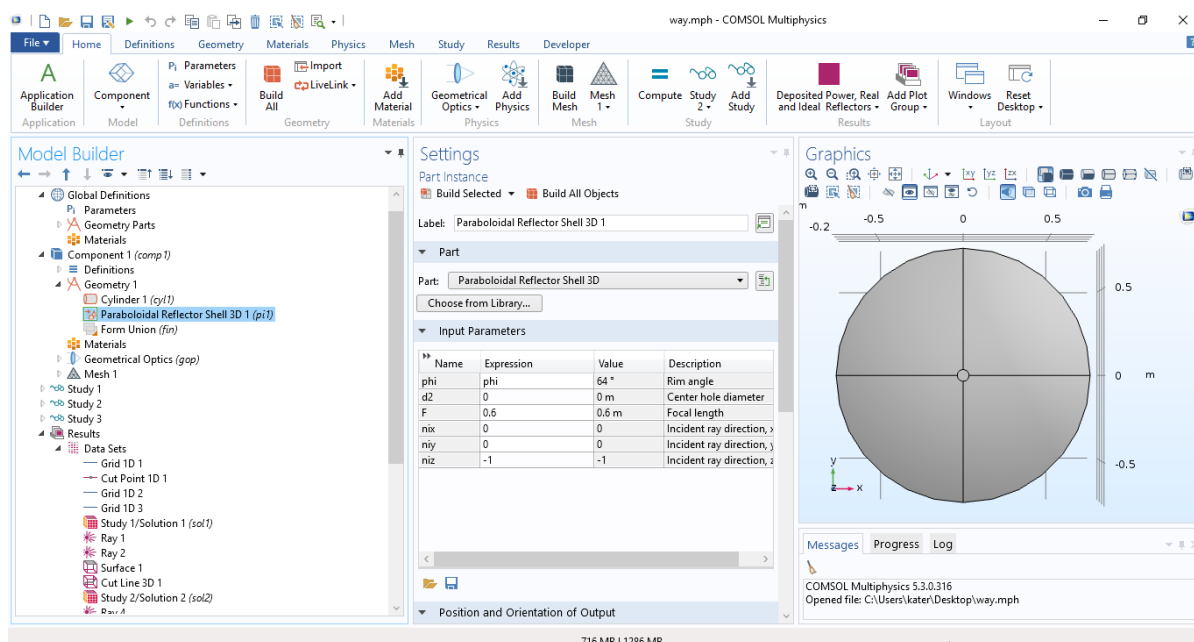


Рисунок 3.1 – Інтерфейс програми COMSOL 5.3

Інтерфейс програми є досить зрозумілим та зручним у використанні. На верхній горизонтальній панелі розташовано основні функції. З правої сторони «Побудова Моделі» - де прослідковуються всі операції здійсненні під час моделювання. В ході виконання моделювання можна змінювати налаштування та візуально відстежувати зміни у колонці «Графіки».

В рамках дослідження використовується вбудований модуль «GeometryOptics», який надає можливість простежити рух сонячних променів, оцінити тепловий потік на приймач, яким виступає двигун Стірлінга.

### 3.2 Опис досліджувального концентратора

За основу для побудови моделі було обрано сонячний концентратор СПК-1. Згідно специфікації СПК-1 має такі технічні характеристики:

- Пікова потужність – 3,8 кВт (при потужності 1000Вт / м<sup>2</sup>);
- Діаметр рефлектора – 1,5 м;
- Площа параболічного дзеркала – 1,77 м<sup>2</sup>;



- Фокусна відстань – 0,6 м;
- Висота опори - 3,5 м;
- Вага відбивача - 476 кг;
- Загальна вага -1083 кг;
- Розмір абсорбера – 66 x 100 мм;
- Кут розкриття концентратора – 64 \*;
- Діаметр фокальної плями – 0,1 м;
- Радіус фокального зображення – 0,05 м;
- ККД оптичної системи – 0,5;
- Теплова потужність – 1,8 кВт;
- Максимальна температура – 1273 К;
- Максимальний тепловий потік – 80 Вт/см<sup>2</sup>;
- Мінімальний тиск у робочих порожнинах – 0,101325 Мпа.

Всі конструктивні та геометричні особливості сонячного параболоїдного концентратора було враховано при побудові моделі. Побудовану геометричну модель СК разом з циліндричним приймачем у середовищі Comsol зображено на рисунку 3.2.

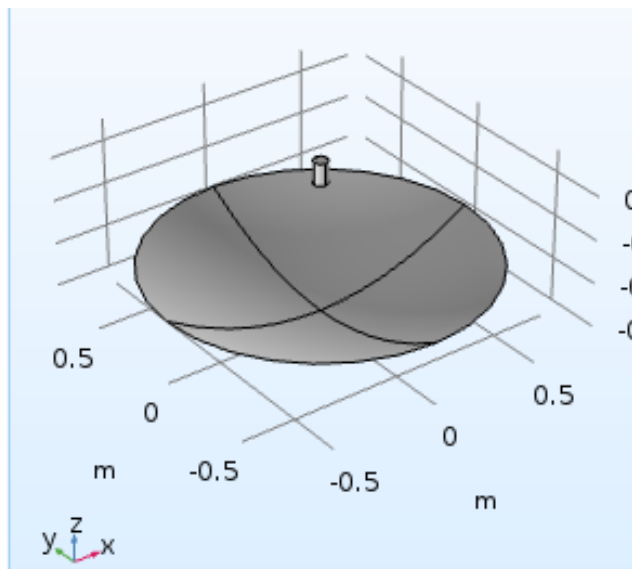


Рисунок 3.2 – Побудована 3D модель параболоїдного сонячного концентратора у середовищі Comsol

Конструкція параболічного сонячного концентратора з фокусною відстанню  $f = 0,6$  м побудована з використанням вбудованої частини для модуля Optics Ray. Геометрія також включає в себе невеликий циліндр.

Принцип роботи параболоїдного концентратора показано на рисунку 3.3. Сонячне випромінювання потрапляє на дзеркальний рефлектор і відбивається від концентратора. Промені сходяться в надзвичайно малу площу у фокальній площині, де можна розташувати приймач сонячної енергії.

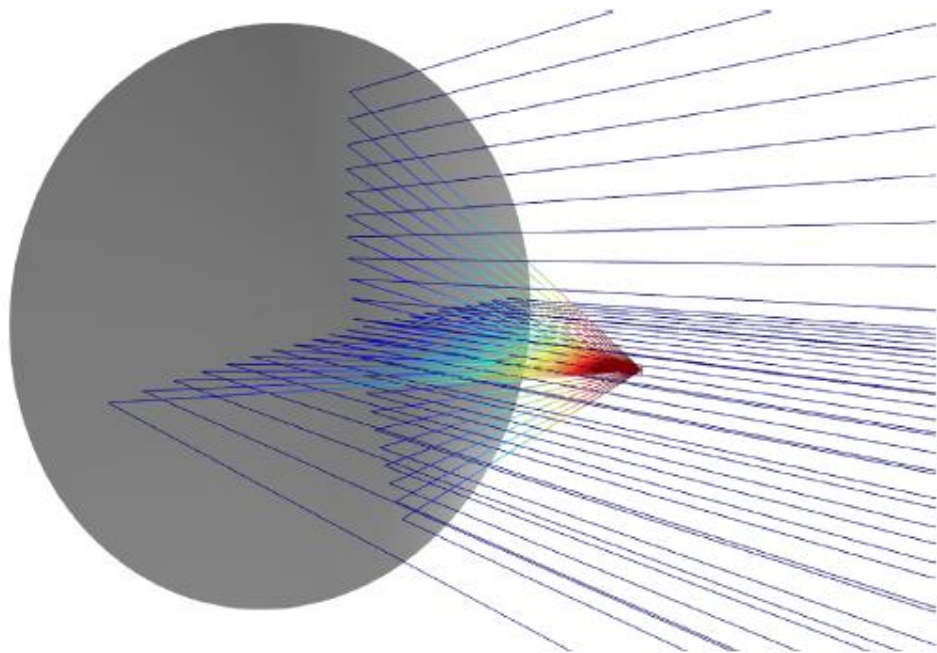


Рисунок 3.3 – Принцип роботи сонячного концентратора

Важливим показником в прогнозуванні розподілу температури є коефіцієнт концентрації, тобто співвідношення падаючого потоку на поверхні приймача до зовнішнього сонячного потоку [25]. Цей показник збільшується, коли опромінення фокусується на меншу площу або коли зменшуються втрати в системі, такі як поглинання на поверхні рефлектора.

Даний параметр показує, що концентратор здатний ефективно фокусувати сонячне випромінювання. При обчисленні коефіцієнта концентрації



падаючий потік може бути виміряний у фокальній площині або на поверхні приймача.

Приймач може мати різні варіанти форм, але так як приймачем даної установки виступає двигун Стірлінга УДС-1, узагальнено приймається циліндрична форма.

Ідеальний параболічний відбивач може зосередити промені в одній точці. Однак багато зовнішніх факторів перешкоджають цьому ідеалізованому рефлектору навіть у контексті геометричної оптики, в якій ми нехтуємо дифракцією. Існує ряд обмежуючих факторів у системі, які можуть перешкоджати фокусуванню параболічного відбивача.

Частка падаючої сонячної енергії буде поглинена, а не відбита, параболічним дзеркалом. Навіть нове дзеркало поглинає деяку частку падаючої енергії, а роки зносу можуть ще більше погіршити його продуктивність [26]. У цій моделі поглинальний коефіцієнт  $\leq 0,1$ . Це означає, що відображається 90% вхідного випромінювання.

Додаткова корекція включена у зв'язку з кінцевим розміром Сонця. Не всі промені падають паралельно. Замість цього падаючі промені відбиваються з максимальним кутом  $\psi_m = 4,65$  мрад.

Справжнє дзеркало не є абсолютно гладким. У параболічному рефлекторі завжди існує певне відхилення в нормальному напрямку поверхні від ідеального випадку. Це спричиняє недосконале фокусування сонячної радіації, поширюючи тепловий потік на велику ділянку у фокальній площині.

Модель включає два дослідження, кожен з яких відповідає окремому екземпляру. Для кожного дослідження промені випускаються з 1000 різних точок.

Моделювання здійснювалось паралельно для реального та ідеального рефлектора у чотири етапи:

1. Створення моделі трасування променів;
2. Візуалізація розподілу теплового потоку на поверхні циліндричного

приймача;

3. Графічне порівняння азимутально усередненого коефіцієнта концентрацій у фокальній площині до теоретичного розрахунку [7, 8];

4. Пряме порівняння розподілів теплового потоку при включенні шорсткості, поглинання, наявності фокальної плями (реальний рефлектор) та при недотриманні цих ефектів (ідеальний рефлектор).

Також різниця обрахунку ідеальної та реальної поверхонь полягає у тому, що для реальної відбиваючої поверхні вважаємо відсутнім процес поляризації. В той час як для ідеальної поверхні – поляризація буде проходити в повному обсязі.

### **3.3 Метод інтеграції для ідеально гладких концентраторів**

Доступні різні розрахункові методи прогнозування коефіцієнта концентрацій. С. Джетер запропонував напіваналітичний метод, в якому коефіцієнт концентрації обчислюється шляхом інтеграції розподілу інтенсивності по поверхні концентратора[8]. Стандартною практикою в багатьох дослідницьких установах сонячної енергії є вимірювання концентрованого сонячного потоку за допомогою фотокамер із зарядовим зв'язком (ФЗЗ) [24].

Розглянемо диференціальну зону елементів на поверхні концентратора при  $r_c$  і у фокальній площині приймача при  $r$ , як показано на рисунку 3.4 де  $e$  нормалі до поверхні концентратора та фокальну площину  $r_c n_c$  і  $r_n$  відповідно [27].

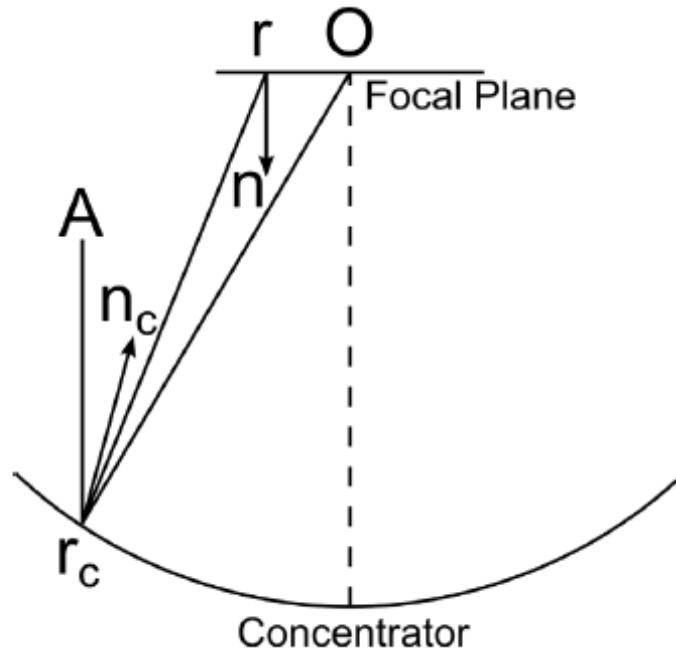


Рисунок 3.4 – Діаграма параболоїдного сонячного концентратора

Визначені наступні кути:

$$\delta_1 = \angle Or_c r, \quad (3.1)$$

$$\theta_c = \angle r_c r n_c, \quad (3.2)$$

$$\theta = \angle r_c r n. \quad (3.3)$$

Коефіцієнт концентрації визначається:

$$C(r) = \frac{1}{I_0} \int_{\Omega} \frac{f \cdot \cos(\theta) \cdot \cos(\theta_c)}{|r - r_c|^2} dA_c, \quad (3.4)$$

де  $f$  – інтенсивність випромінювання, Вт/мм<sup>2</sup>;

$\Omega$  – означає поверхневу інтеграцію поверх колектора;

$dA_c$  – диференціал елемента площі на поверхні сонячного колектора, м<sup>2</sup>.

$$f(\delta) = \begin{cases} \frac{I_0}{\pi \sin(\psi_m)^2}, & \delta \leq \psi_m, \\ 0, & \delta > \psi_m \end{cases}, \quad (3.5)$$

де  $I_0$  - сонячне випромінювання, Вт/м<sup>2</sup>;

$\psi_m$  - максимальний кут сонячного диску, рад.

У рівнянні 3.2 передбачається, що падаючий сонячний потік не залежить від функції положення сонячного диску; тобто ніякого сонячного затемнення не розглядається. Однак можливо розширити рівняння 3.2, щоб врахувати затемнення, включивши термін залежності від кута  $\delta$  на правій стороні.

### **3.4 Моделювання параболоїдного сонячного концентратора з ідеальним рефлектором**

Для моделювання сонячного концентратора необхідно застосовувати вбудований модуль «GeometryOptics».

Користуючись модулем геометричної оптики COMSOL Multiphysics, є можливість моделювати трасування променів. Трасування променів є способом створення зображення тривимірних об'єктів за допомогою відстеження ходу променя світла крізь точку екрану і симуляції взаємодії цього променя з уявними об'єктами, що підлягають відображенню [8]. Промені випускаються з 1000 різних точок. Цієї кількості достатньо для точного розподілу теплових потоків. Кожен випущений промінь наділений фіксованою потужністю. Трасування променів для ідеального рефлектора зображено на рисунку 3.5.

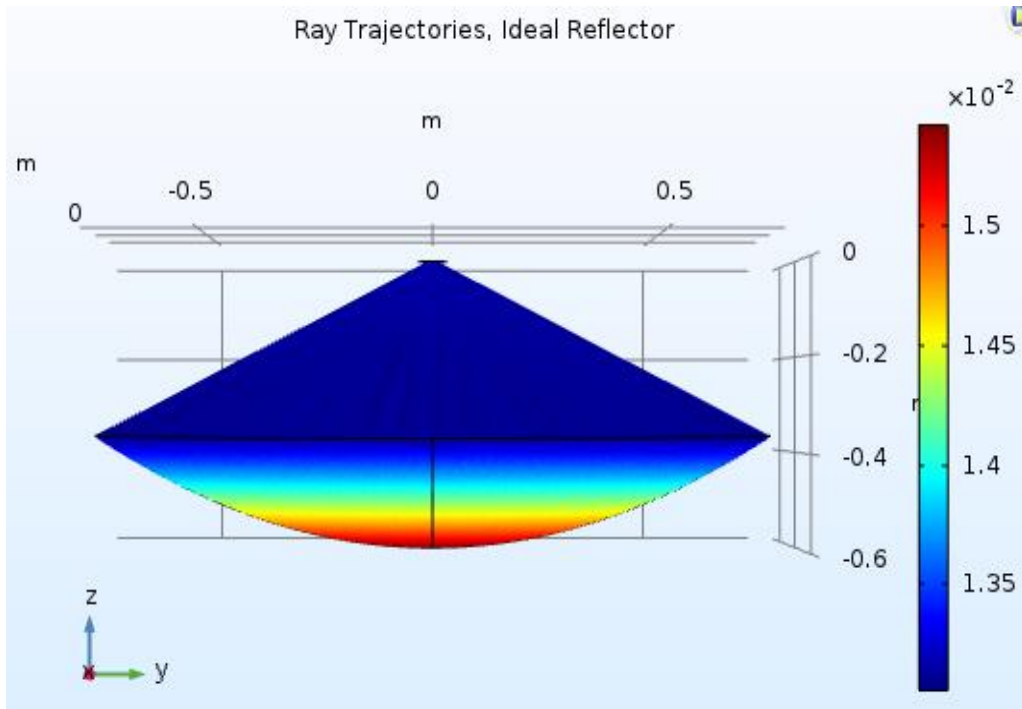


Рисунок 3.5 - Трасування сонячних променів від ідеальної поверхні рефлектора

Дзеркальна поверхня використовується безпосередньо для відбиття променів з поверхні. Напрямок, при якому промені виходять з поверхні концентратора залежить від вектора вхідного напрямку променя  $n_i$  і норми зовнішньої поверхні  $n_s$ , відповідно до формули [28]:

$$n_r = n_i - 2(n_i \cdot n_s)n_s. \quad (3.6)$$

Траєкторія відбивання променя сильно залежить від кривизни концентратора. Кожен випущений промінь також призначається фіксованою потужністю, яка призначена відповідним значенням на основі параметра джерела живлення для функції освітленої поверхні. Коли промені досягають поверхні сонячного концентратора, їх зупиняють функції стіни.

Падаючий тепловий потік, що надходить на поверхню ідеального приймача, показаний на рисунку 3.6.

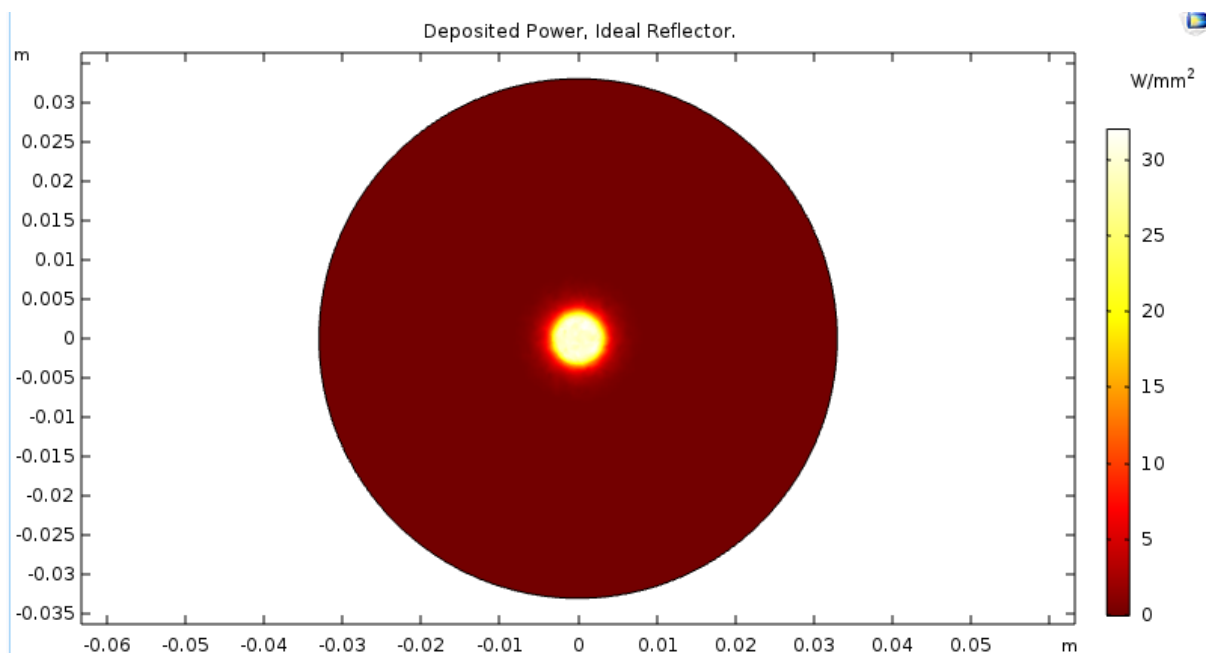


Рисунок 3.6 – Тепловий потік на поверхні приймача для ідеального рефлектора

Тепловий потік ідеальної системи надзвичайно високий, середня величина близько  $28 \text{ Вт/мм}^2$  (у межах  $\pm 5 \text{ мм}^2$ ). В деяких границях ( $\pm 4 \text{ мм}^2$ ) тепловий потік досягає  $32 \text{ Вт/мм}^2$ . Це демонструє необхідність усереднення в азимутальному напрямку, щоб більш послідовно порівнювати коефіцієнт концентрації з опублікованими значеннями.

Азимутально усереднений коефіцієнт концентрації на рисунку 3.7.

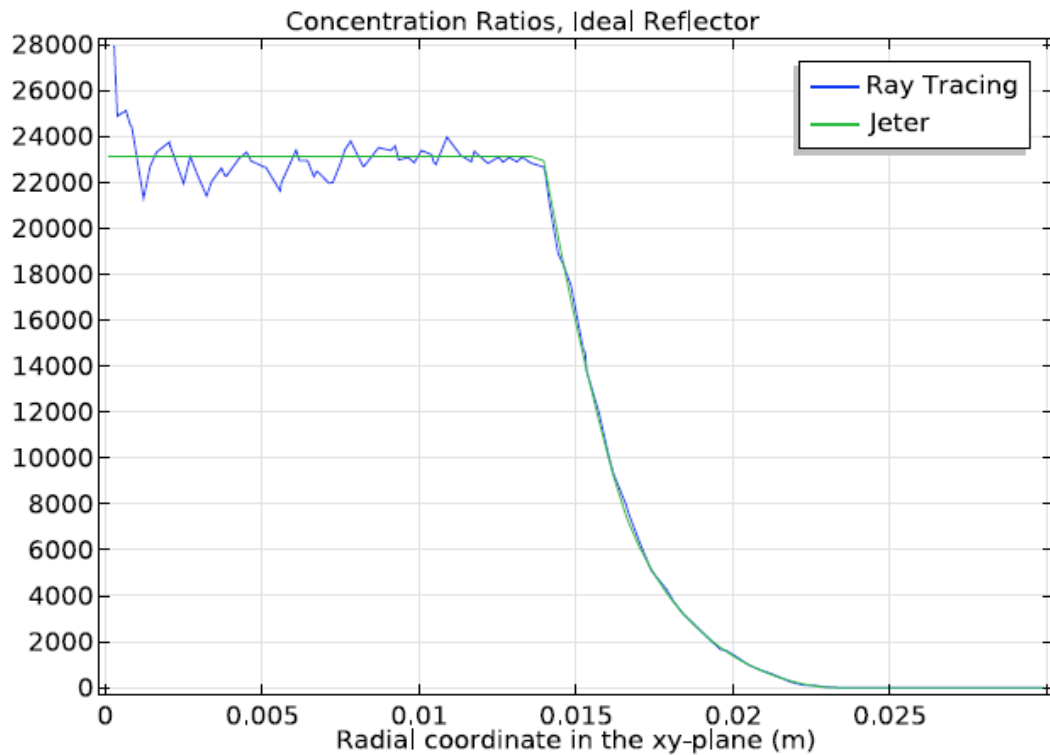


Рисунок 3.7 – Порівняння азимутально усередненого обчисленого коефіцієнта концентрацій у приймачі з напіваналітичним рішенням для ідеального рефлектора

### 3.5 Моделювання параболоїдного сонячного концентратора з реальним рефлектором

Наступним кроком є моделювання параболоїдного сонячного концентратора з реальним рефлектором. Першим етапом є створення моделі трасування променів від рефлектора до приймача (рисунок 3.8).

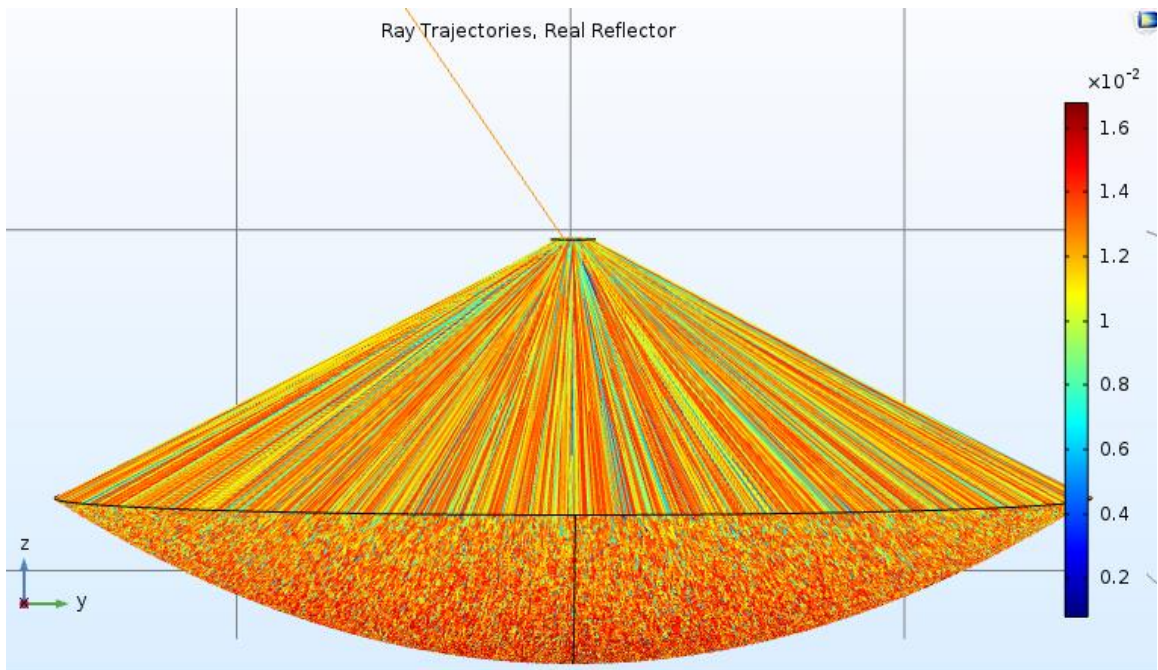


Рисунок 3.8 – Трасування сонячних променів від реальної поверхні рефлектора до приймача

Розподіл теплового потоку у фокальній площині для реального рефлектора показаний на рисунку 3.9.

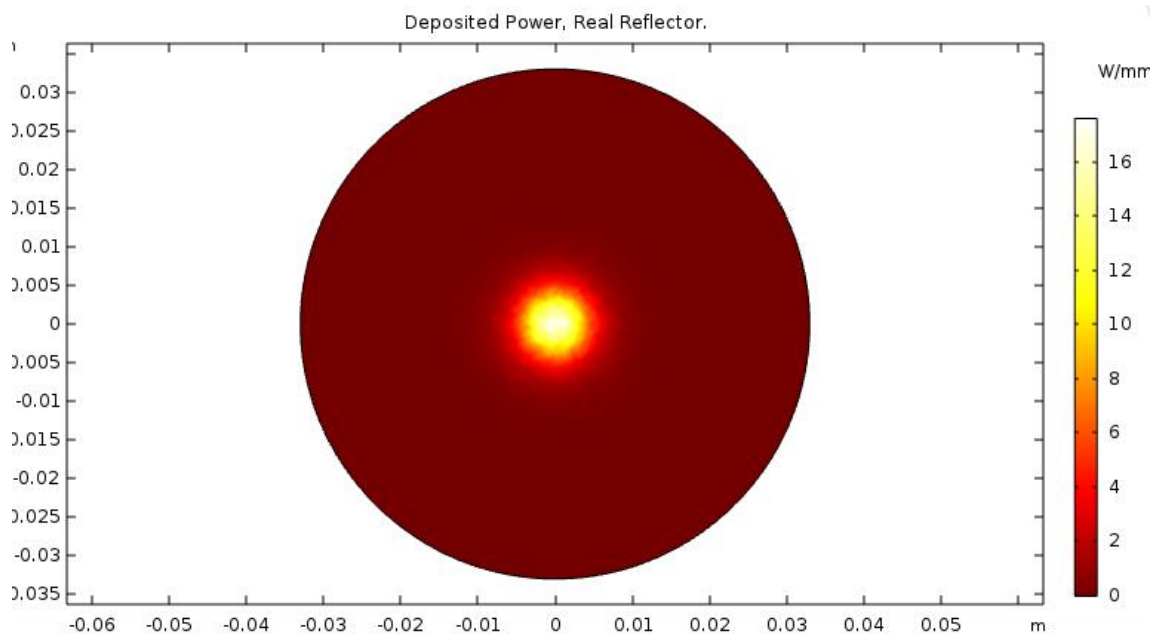


Рисунок 3.9 – Тепловий потік на поверхні приймача для реального рефлектора



Розповсюдження теплового потоку є набагато ширшим на реальному рефлекторі порівняно з ідеальним. Відсутнє будь-яке чітко визначене плато. Максимальний потік також значно скоротився [29].

Порівняння азимутальноусередненого коефіцієнта концентрацій з напіваналітичним рішенням для реального рефлектора, зображено на рисунку 3.10.

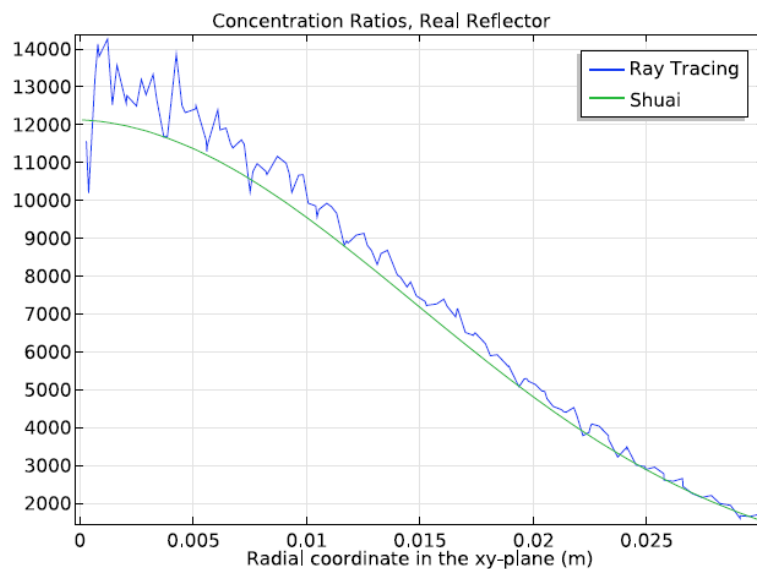


Рисунок 3.10 – Порівняння азимутальноусередненого обчисленого коефіцієнта концентрацій з напіваналітичним рішенням для реального рефлектора

### 3.6 Порівняння отриманих результатів для параболоїдного концентратора з ідеальним та реальним рефлектором

Кінцевим етапом є порівняння отриманих результатів, а саме – теплових потоків на поверхні приймача. На рисунку 3.11 видно, що при ідеальній ситуації потік більш сконцентрований в одній точці.

У результаті дослідження моделі трасування променів для ідеального рефлектора отримано максимальний тепловий потік на одиницю поверхні приймача  $30 \text{ Вт/мм}^2$  та аналогічне середнє значення –  $18 \text{ Вт/мм}^2$ . Для реального рефлектора ці показники відповідно склали  $20 \text{ Вт/мм}^2$  та  $9 \text{ Вт/мм}^2$ .

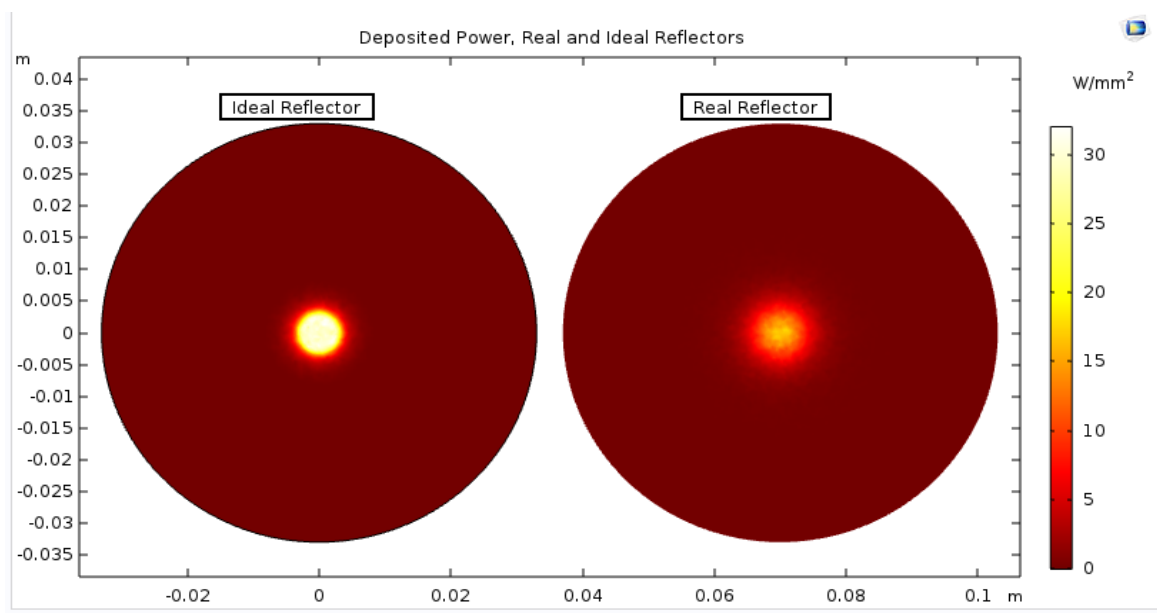


Рисунок 3.11 – Порівняння отриманих теплових потоків на поверхню приймача

Необхідно також відмітити, що при порівнянні азимутальноусередненого обчисленого коефіцієнта концентрацій з напіваналітичним рішенням – обидва варіанти знову підтверджують свою відповідність. Чіткіша статистична збіжність може бути досягнута тільки шляхом збільшення кількості променів.

## Висновки

1. У даній роботі було проведене моделювання сонячного концентратора з ідеальною та реальною відбиваючими поверхнями у програмному забезпеченні COMSOL.
2. Алгоритм моделювання:
  - Побудова траєкторії відбитих сонячних променів від рефлектора до приймача (трасування променів);
  - Визначення та візуалізація теплового потоку на поверхню приймача;

- Порівняння азимутальноусередненого обчисленого коефіцієнта концентрацій у приймачі до напіваналітичного рішення.

3. Задачею моделювання також було показати важливість врахування всіх реальних факторів, які впливають на ефективність відбиття сонячних променів від поверхні концентратора.

4. У результаті дослідження моделі трасування променів для ідеального рефлектора отримано максимальний тепловий потік на одиницю поверхні приймача 30 Вт/мм<sup>2</sup> та аналогічне середнє значення – 18 Вт/мм<sup>2</sup>. Для реального рефлектора ці показники відповідно склали 20 Вт/мм<sup>2</sup> та 9 Вт/мм<sup>2</sup>.

5. Програмне забезпечення ComsolMultiphysics допомагає зробити прогноз коефіцієнта концентрації ідеалізованого та реального сонячного концентратора для подальшої оцінки доцільності впровадження ПСК на базі двигуна Стірлінга.

6. Модуль GeometricOptics програмного забезпечення COMSOL є надзвичайно корисним при проектуванні сонячних концентраторів, адже може не тільки візуалізувати теплові процеси, а і показати важливість врахування всіх факторів для подальшого ефективного моделювання та впровадження.

## 4 СТАРТАП-ПРОЕКТ

### 4.1 Зміст ідеї для стартап проекту

В якості стартап-проекту пропонується нове програмне забезпечення для розрахунку параболоїдних та параболоциліндричних сонячних концентраторів. Суть ідеї детально описано в таблиці 4.1.

Таблиця 4.1 – Опис ідеї-стартапу

| Зміст ідеї                                                                                                          | Напрямок застосування                            | Вигоди для користувача                                                |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------|
| Використання програмного забезпечення для розрахунку параболоїдних та параболоциліндричних сонячних концентраторів. | Проектування нових СК                            | Обрахунок параболоїдного концентратора                                |
|                                                                                                                     | Вдосконалення існуючих СК                        | Обрахунок параболоциліндричного концентратора                         |
|                                                                                                                     | Розрахунок доцільності впровадження СК           | Зрозумілий інтерфейс програми                                         |
|                                                                                                                     | Застосування на промисловому та споживчому рівні | Можливість швидкого розрахунку основних енергетичних характеристик СК |

Зараз існують тільки програми обрахунку параболоциліндричних концентраторів, так як вони є найбільш популярним типом СК. Найбільш відомою програмою в цій області є програма, створена Р.Акбаровим [21].

В таблиці 4.2 наведено порівняння двох програм між собою, проведена оцінка конкурентоспроможності створеної програми. Слабкі сторони в таблиці позначені *W*, нейтральні – *N*, сильні – *S*.

Таблиця 4.2 – Порівняння нової програми з конкурентною

|   | Техніко-економічні показники | Конкуренція                                                                                       |                                                                         | W | N | S |
|---|------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------|---|---|---|
|   |                              | Мій проект                                                                                        | Програма Р. Акбарова                                                    |   |   |   |
| 1 | Щорічні додаткові інвестиції | Програма готова до використання, не потребує постійних капіталовкладень                           | Програма готова до використання, не потребує постійних капіталовкладень |   | + |   |
| 2 | Термін окупності             | 1 рік                                                                                             | 2 роки                                                                  |   |   | + |
| 3 | Зручність                    | Яскравий інтерфейс                                                                                | Простий інтерфейс                                                       |   |   | + |
| 4 | Інформаційне забезпечення    | Всі вхідні та вихідні величини детально розписані, вказані одиниці виміру. Розраховує два типи СК | Розраховує тільки параболоциліндричні СК                                |   |   | + |
| 5 | Універсальність              | Підходить для обрахунку 2х типів СК                                                               | Підходить для обрахунку тільки параболоциліндричного СК                 |   |   | + |

Технологічна здійсненність ідеї проекту представлена в таблиці 4.3.

Таблиця 4.3 – Технологічна здійсненність ідеї проекту

| Ідея проекту                                                                                  | Технологія реалізації                               | Наявність технологій | Доступність технологій                                  |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------|----------------------|---------------------------------------------------------|
| Використання програмного забезпечення для розрахунку параболоїдних та параболоциліндричних СК | 1. Програмування за допомогою «Borland C++ Builder» | Наявні               | У вільному доступі. Користування програмою безкоштовне. |
|                                                                                               | 2. Програмування за допомогою «Delphi»              | Наявні               | Користування програмою платне.                          |
|                                                                                               | 3. Програмування за допомогою «Python»              | Наявні               | Користування програмою платне.                          |
| Обрана технологія реалізації проекту №1 – програмування в «Borland C++ Builder»               |                                                     |                      |                                                         |

За результатами аналізу таблиці 4.3 можна зробити висновок, що технологічна реалізація проекту можлива.

У таблиці 4.4 наведено характеристики потенційних клієнтів.

Таблиця 4.4 – Характеристики потенційних клієнтів

| Потреба, що формує ринок                                                                            | Цільова аудиторія                                        | Відмінності у поведінці різних потенційних цільових груп клієнтів                                                                                                                                                                                                                                 | Вимоги споживачів до товару                                                                                 |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Розрахунок основних енергетичних характеристик параболоїдних та параболоциліндричних концентраторів | Енергетичні компанії, домашні господарства, підприємства | Енергетичні компанії зможуть застосувати при глобальному проектуванні сонячних ферм з метою продажу електроенергії; домашні господарства – при розрахунку доцільності покупки концентратора і задоволення власних енергетичних потреб; підприємства – для задоволення власних енергетичних потреб | Зрозумілий інтерфейс, зручне користування, можливість здійснення реального прогнозу енергетичних параметрів |

Можна виділити ряд переваг наявності такої програми:

- перевірка доцільності використання певного концентратора сонячної енергії;
- можливість дізнатись енергетичні характеристики з урахування всіх реальних факторів;
- оцінка ефективності роботи 2 типів концентраторів: параболоїдного та параболоциліндричного.

Дана програма працює для концентраторів будь-якого діаметру, з різною фокальною довжиною та різним ступенем відбиття сонячного проміння тощо.

Звісно у даної програми є недоліки:

- не існує бази даних, тому за деякими показниками доведеться звертатись до відповідних довідників;

- немає можливості вказати тип приймача сонячної енергії для параболоїдних концентраторів (за замовчання прийнято циліндричну форму).

Дані недоліки є не значними, оскільки:

- дані сонячної радіації для різних регіонів України були зібрані на протязі багатьох років та зараз існують у вільному доступі.

Так як, у розділі 2 наведено алгоритм розрахунку та всі необхідні формули, можна провести програмування в більш сучасній програмі "Python", внести всі дані баз даних і ще більш полегшити користування.

## **Висновки**

1. В основу розробки ідеї для стартап-проекту покладені результати дослідження можливостей застосування сонячних концентраторів.

2. Для подальшого розвитку даної ідеї необхідно оцінити ринкові можливості, які можна використати під час впровадження проекту, а також проаналізувати інші програмні забезпечення, які можуть заважати реалізації проекту. Зібрані дані допоможуть визначити необхідність використання даного програмного забезпечення на ринку України в цілому.

3. Перевагою даного стартап-проекту є можливість використання програмного забезпечення різними категоріями споживачів, що збільшує попит.

## ВИСНОВКИ

1. Світові тенденції спрямовані на розвиток сонячних ферм на основі концентраторів різних геометричних форм. Широко розповсюджені параболоциліндричні СК. Перспективним є напрямок розробки параболоїдних СК на базі двигуна Стірлінга та впровадження їх для забезпечення енергетичних потреб на промисловому рівні.

2. Проведено дослідження різних методик визначення основних енергетичних характеристик сонячних концентраторів. Запропоновано новий підхід розрахунку параболоїдного концентратора. Перевірено правильність і доцільність використання нового підходу. Проведено порівняльний аналіз результатів отриманих класичними формулами та новими.

3. Розроблено універсальну програму у середовищі Borlan C++ Builder, зрозумілу в користуванні, яку доцільно використовувати при проектуванні і експлуатації сонячних концентраторів параболоїдної та параболоциліндричної геометричної форми.

4. У даній роботі було проведено моделювання сонячного концентратора з ідеальною та реальною відбиваючими поверхнями у програмному забезпеченні COMSOL, внаслідок якого стає зрозумілою необхідність урахування всіх реальних факторів при проектуванні для отримання правдивих результатів.

5. В основу розробки ідеї для стартап-проекту покладені результати дослідження можливостей застосування сонячних концентраторів. Перевагою даного стартап-проекту є можливість використання програмного забезпечення різними категоріями споживачів, що збільшує попит.



## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Сацик Р.Ю. Моделювання систем теплопостачання на основі відновлювальних джерел енергії. – К.: Оріон, 2017. – 115с.
2. Україна комунальна: головний експерт житлово–комунального сектору України [Електронний ресурс]: Вирішення проблеми енергозбереження. Режим доступу: <http://jkg-portal.com.ua/ua/publication/one/678329068>.
3. Славінська К.О., Студенець В.П. Особливості моделювання сонячного параболоїдного концентратора в програмному середовищі Comsol Multiphysics / матеріали XVI-ї міжнародної науково-практичної конференції "Сучасні проблеми наукового забезпечення енергетики", (Київ, 24–27 бер. 2018 р.) / НТУУ "КПІ ім. І. Сікорського". – Київ : НТУУ "КПІ ім. І. Сікорського", 2018. С.180.
4. Захидов Р.А., Умаров Г.Я., Вайнер А.А. Теория и расчет гелиотехнических концентрирующих систем. – Ташкент, Фан, 1977. – 255с.
5. НВИЭ [Електронний ресурс]: Сонячна енергетика. Режим доступу: <http://www.bibliotekar.ru/alterEnergy/>
6. Stoudenets V.P., Tsyryn N.N., Dovgyi S.S. and other. The Characteristics of Solar Dish / Proceedings IGEC-8 : 17–19 June 2013, Kyiv. – Kyiv, 2013.
7. Shuai Y., Xia X.L., Tan H.P. Radiation performance of dish solar concentrator/ cavity receiver systems // Solar Energy. – 2008. –№5. –pp. 13–21.
8. Jeter S. M. The distribution of concentrated solar radiation in paraboloidal collectors // Journal of Solar Energy Engineering. 1986. –№7. –pp. 219–225.
9. Захидов Р.А. Технология и испытания гелиотехнических концентрирующих систем – Ташкент, Фан, 1978. – 184 с.
10. ДТЕК – лидер топливно-энергетического рынка Украины [Електронний ресурс]: Зеленая энергетика. Режим доступу: [dtek.com](http://dtek.com).

11. Сонячна енергетика України [Електронний ресурс]: Як створити концентратор сонячної енергії своїми руками. Режим доступу: <http://jak.magey.com.ua/articles/jak-zrobiti-sonjachnij-koncentrator-svoimi-rukami.html>.
12. Захидов Р.А. Зеркальные системы концентрации. – Ташкент, Фан, 1980. – 225 с.
13. Родовід: науково–популярне інтернет–видання [Електронний ресурс]: 10 найпотужніших сонячних електростанцій в світі. Режим доступу: [https://rodovid.me/solar\\_power/10-krupneyshih-solnechnyh-elektrostantsiy-v-mire.html](https://rodovid.me/solar_power/10-krupneyshih-solnechnyh-elektrostantsiy-v-mire.html).
14. Держенергоефективності України [Електронний ресурс]: Сонячна енергетика. Режим доступу: [http://saee.gov.ua/uk/ae/solar\\_energy/](http://saee.gov.ua/uk/ae/solar_energy/).
15. Стребков Р.А., Тверьянович С.А. Концентраторы солнечного излучения. – М.: Высшая школа, – 2007. – 315 с.
16. Книга о "Солнце". Справочник: В 2-х т./ Под общ.ред. И.О. Драголюбова. Т.1 Руководство по проектированию систем солнечного теплоснабжения. Справочник/ Под. ред. С.И. Иванова.-М.: Орион, 2010. – 194с.
17. SBPartner [Електронний ресурс]: 50 kw dish/Stirling system. Режим доступу: <https://www.sbp.de/en/project/50-kw-dishstirling-system/>.
18. SBPartner [Електронний ресурс]: 10 kw dish/Stirling system. Режим доступу: <https://www.sbp.de/en/project/10-kw-dishstirling-eurodish-country-reference-unit/>.
19. Апариси Р.Р. Экспериментальная установка для получения высоких температур /В сб.: Использование солнечной энергии. – М.: АН СССР. – 1957. С. 151 – 162.
20. Жозе П. Распределение плотности потока энергии в фокальном изображении солнечной печи / В. сб.: Солнечные высокотемпературные печи. – М.: АН СССР. – 1960. С.229–239.

21. Акбаров Р.О., Кучкаров А.А. Аналитическая формула для расчета энергетических характеристик солнечного параболоцилиндрического концентратора // Гелиотехника. – 2003. С.10–14.
22. Захидов Р.А, Кличев Ш.И Максимальная концентрирующая способность параболоцилиндрических зеркал // Гелиотехника. – 1973. –С.46–47.
23. Асоціація біоенергетичних структур [Електронний ресурс]: Розвиток відновлюваних джерел енергії в Україні – Режим доступу: <http://abc.in.ua/wp-content/uploads/2017/03/Rozvitok-VDE-v-Ukrai-ni.pdf>.
24. Комсол [Електронний ресурс]: Модуль геометричної оптики. Режим доступу: [www.comsol.net](http://www.comsol.net).
25. Johnston G. Focal region measurements of the 20 m<sup>2</sup> tiled dish at the Australian national university // Solar Energy. – 1998 – pp. P. 117–124.
26. Schubnell M. Sunshape and its influence on the flux distribution in imaging solar concentrators // Journal of Solar Energy Engineering. – 1992. –pp.260–266.
27. Hestroffer D. and Magnan C. Wavelength dependency of the Solar limb darkening // Astrophysics. -1998. – P. 338–342.
28. Rannels J. The DOE office of solar energy technologies vision for advancing solar technologies in the new millennium / J. Rannels // Solar energy. – 2000. –pp. 363–368.
29. Славінська К.О., Студенець В.П. Моделювання параболоїдного концентратора для сонячної енергетичної установки на базі двигуна Стірлінга Multiphysics / матеріали X-ї міжнародної науково-практичної конференції "Енергетика. Екологія. Людина", (Київ, 25-28 квіт. 2018 р.) / НТУУ "КПІ ім. І. Сікорського". – Київ : НТУУ "КПІ ім. І. Сікорського", 2018.

УДК 621.472

Магістрант 6 курсу, гр. ОТ-61м Славінська К.О.

Доц., к.т.н. Студенець В.П.

## ОСОБЛИВОСТІ МОДЕЛЮВАННЯ СОНЯЧНОГО ПАРАБОЛОЇДНОГО КОНЦЕНТРАТОРА В ПРОГРАМНОМУ СЕРЕДОВИЩІ COMSOL MULTIPHYSICS

Робота стосується дослідження особливостей функціонування параболоїдного сонячного концентратора (ПСК) як структурного елементу сонячної енергетичної установки (СЕУ) на базі двигуна Стірлінга (УДС-1).

Принцип роботи ПСК полягає у відбитті рефлектором сонячних променів з подальшою концентрацією сонячного випромінювання в теплоприймачі, розташованому в оптичному фокусі ПСК [1]. Як динамічний перетворювач в СЕУ використано двигун Стірлінга, який визнано одним з найбільш перспективних перетворювачів як для модульних, так і для автономних СЕУ [2].

Актуальність проблеми полягає в необхідності моделювання сонячного параболоїдного концентратора для розрахунку доцільності впровадження з подальшою метою отримання теплової або електричної енергії на промисловому чи споживчому рівні.

Метою роботи є створення моделі трасування променів для існуючого ПСК [3] в програмному забезпеченні ComsolMultiphysics. Основним показником ефективної роботи є коефіцієнт концентрації, визначення якого базується на роботах [4, 5]

Моделювання здійснювалось паралельно для реального та ідеального рефлектора у чотири етапи:

1. Створення моделі трасування променів;
2. Візуалізація розподілу теплового потоку на поверхні циліндричного приймача;
3. Графічне порівняння азимутально усередненого співвідношення концентрацій у фокальній площині до теоретичного розрахунку [4, 5];
4. Пряме порівняння розподілів теплового потоку при включенні шорсткості, поглинання, наявності фокальної плями (реальний рефлектор) та при недотриманні цих ефектів (ідеальний рефлектор) [6].

У результаті дослідження моделі трасування променів для ідеального рефлектора отримано максимальний тепловий потік на одиницю поверхні приймача  $30 \text{ Вт/мм}^2$  та аналогічне середнє значення –  $18 \text{ Вт/мм}^2$ . Для реального рефлектора ці показники відповідно склали -  $20 \text{ Вт/мм}^2$  та  $9 \text{ Вт/мм}^2$ .

### Перелік посилань:

1. Захидов Р.А. Технология и испытания гелиотехнических концентрирующих систем / Р.А. Захидов. – М. :Основа, 1978. – 184 с.
2. Rannels J. The DOE officeofsolarenergytechnologiesthevisionforadvancingsolartechnologiesinthenewmillennium / J. Rannels // Solarenergy. – 2000. – Vol.69.No. 5. – P. 363–368.
3. Stoudenets V.P. The Characteristics of Solar Dish/Stirling System Basedon UDS-1 Machine/ V.P. Stoudenets, N.N. Tsyryn, S.S. Dovgyi, N.O. Yemanova// Proceedings IGEC-8 : int. conf., 17–19 June 2013, Kyiv. – Kyiv, 2013.
4. Shuai, Y. Xia X. Radiationperformanceofdishsolarconcentratorandcavityreceiversystems / Y. Shuai, X. Xia, H. Tan //SolarEnergy. – 2008. – Vol. 82, No. 4. – P. 13 – 28.
5. Jeter S. Thedistributionofconcentratedsolarradiationinparaboloidalcollectors / S. Jeter //JournalofSolarEnergyEngineering. – 1986. – Vol. 108, No. 6. – P. 219 – 225.

Славінська К.О., магістрант 6 курсу, гр. ОТ-61м  
Студенець В.П., доц., к.т.н., НТУУ "КПІ ім. Сікорського"

### **МОДЕЛЮВАННЯ ПАРАБОЛОЇДНОГО КОНЦЕНТРАТОРА ДЛЯ СОНЯЧНОЇ ЕНЕРГЕТИЧНОЇ УСТАНОВКИ НА БАЗІ ДВИГУНА СТІРЛІНГА**

*У даній статті досліджуються особливості функціонування параболоїдного сонячного концентратора (ПСК) як структурного елементу сонячної енергетичної установки (СЕУ) на базі двигуна Стірлінга (УДС-1). Проведено порівняння створеної моделі ПСК з реальним та ідеальним рефлекторами.*

### **MODELING OF PARABOLOID CONCENTRATOR FOR SOLAR ENERGY INSTALLATION ON THE STIRLING ENGINE BASE**

*This article examines the peculiarities of paraboloid solar concentrator (PSK) as a structural element of the solar power plant (SPP) based on Stirling engine (UDS-1). A comparison of the created PSK model with real and ideal reflectors was performed.*

**Вступ.** Сонячна енергія для досягнення поверхні Землі повинна подолати мільйони миль через вакуум простору. Після тривалої подорожі більша частина енергії відбивається назад у космос або поглинається атмосферою.

Частина сонячної радіації, поглиненої земною поверхнею, досягає пристроїв, які можуть використовувати цю енергію. Наприклад, параболоїдні сонячні концентратори фокусують падаючу сонячну радіацію на невелику область (приймач) [1]. Оскільки сонячна енергія накопичується на великій ділянці, пасивний тепловий потік на приймачі надзвичайно високий. Ця область максимально концентрує сонячну енергію, яка може бути перетворена в хімічну або електричну енергію.

У цій роботі тепловий потік, що надходить на приймач як функція радіального положення, обчислюється та порівнюється з опублікованими значеннями. Розглядається ідеальна та реальна відбиваюча поверхня сонячного концентратора. Реальний рефлектор включає в себе корекції, обумовлені наявністю фокальної плями та шорсткістю поверхні відбивача.

**Аналіз стану питання.** Питання енергозбереження є актуальним як для України так, і для всього світу загалом. Ефективне та раціональне споживання енергоресурсів, впровадження енергоефективних, екологічно чистих технологій є найважливішою тематикою сьогодення [2]. Актуальність проблеми полягає в необхідності моделювання сонячного параболоїдного концентратора для розрахунку доцільності впровадження з подальшою метою отримання теплової або електричної енергії на промисловому чи споживчому рівні [3].

**Мета.** Створення моделі трасування променів для існуючого ПСК [3] в програмному забезпеченні Comsol Multiphysics [4]. Основним показником ефективної роботи є коефіцієнт концентрації, визначення якого базується на роботах [5, 6]

**Результати досліджень.** Важливим показником в прогнозуванні розподілу температури є коефіцієнт, тобто співвідношення падаючого потоку на поверхні приймача до зовнішнього сонячного потоку [7]. Коефіцієнт концентрації збільшується, коли опромінення фокусується на меншу площу або коли зменшуються втрати в системі, такі як поглинання на поверхні рефлектора.

Приймач може мати різні варіанти форм, але приймачем даної установки виступає двигун Стірлінга УДС-1, узагальнено приймається циліндрична форма.

Ідеальний параболічний відбивач може зосередити промені в одній точці. Однак багато зовнішніх факторів перешкоджають цьому ідеалізованому рефлектору навіть у контексті геометричної оптики, в якій ми нехтуємо дифракцією.

Існує ряд обмежуючих факторів у системі, які можуть перешкоджати фокусуванню параболічного відбивача.

Частка падаючої сонячної енергії буде поглинена, а не відбита, параболічним дзеркалом. Навіть нове дзеркало поглинає деяку частку падаючої енергії, а роки зносу можуть ще більше погіршити його продуктивність [7]. У цій моделі поглинальний коефіцієнт  $\leq 0,1$ . Це означає, що відображається 90% вхідного випромінювання.

Справжнє дзеркало не є абсолютно гладким. У параболічному рефлекторі завжди існує певне відхилення в нормальному напрямку поверхні від ідеального випадку. Це спричиняє недосконале фокусування сонячної радіації, поширюючи тепловий потік на велику ділянку у фокальній площині.

Моделювання здійснювалось паралельно для реального та ідеального рефлектора у чотири етапи [8]:

5. Створення моделі трасування променів;
6. Візуалізація розподілу теплового потоку на поверхні циліндричного приймача;
7. Графічне порівняння азимутально усередненого коефіцієнта концентрацій у фокальній площині до теоретичного розрахунку [5, 6];
8. Пряме порівняння розподілів теплового потоку при включенні шорсткості, поглинання, наявності фокальної плями (реальний рефлектор) та при недотриманні цих ефектів (ідеальний рефлектор) [7].

Трасування променів є способом створення зображення тривимірних об'єктів за допомогою відстеження ходу променя світла крізь точку екрану і симуляції взаємодії цього променя з уявними об'єктами, що підлягають відображенню [8]. Промені випускаються з 1000 різних точок. Цієї кількості достатньо для точного розподілу теплових потоків. Кожен випущений промінь наділений фіксованою потужністю. Трасування променів для ідеального та реального рефлектора зображено на рис. 1 та рис. 2 відповідно.

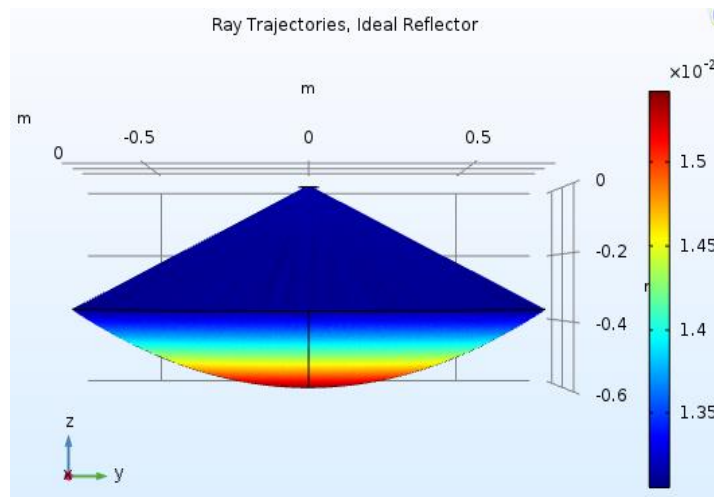


Рис. 1 - Трасування сонячних променів від ідеальної поверхні рефлектора до приймача

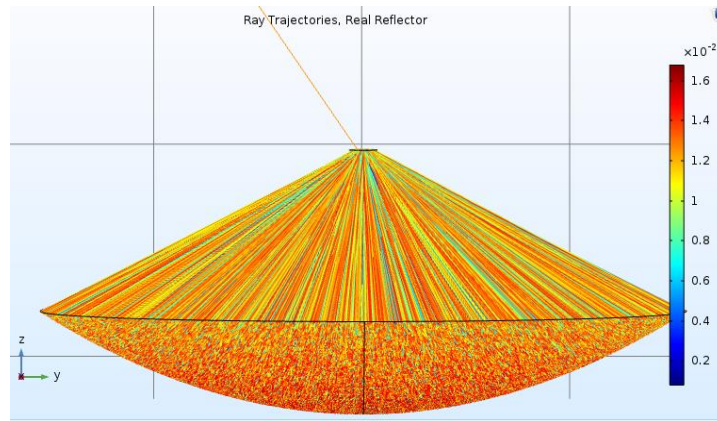


Рис. 2 - Трасування сонячних променів від реальної поверхні рефлектора до приймача

Падаючий тепловий потік, що надходить на поверхню ідеального приймача, показаний на рис. 3. Розподіл теплового потоку у фокальній площині для реального рефлектора показаний на рис. 4. Розповсюдження теплового потоку є набагато ширшим на реальному рефлекторі порівняно з ідеальним. Відсутнє будь-яке чітко визначене плато. Максимальний потік також значно скоротився.

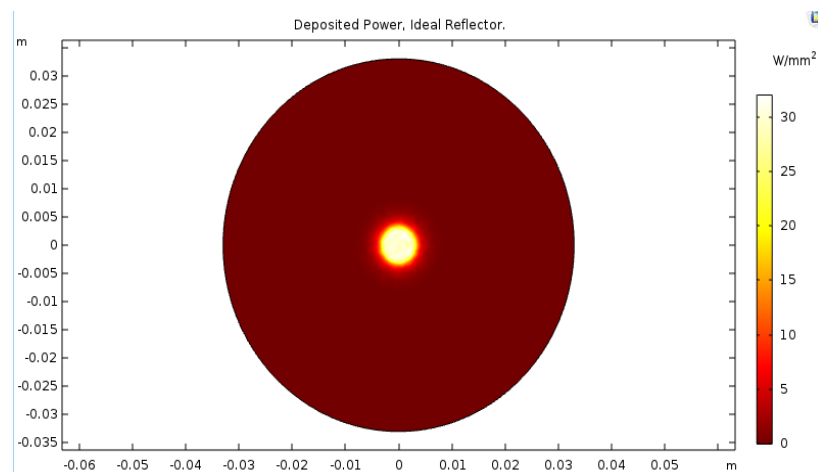


Рис. 3 - Тепловий потік на поверхні приймача для ідеального рефлектора

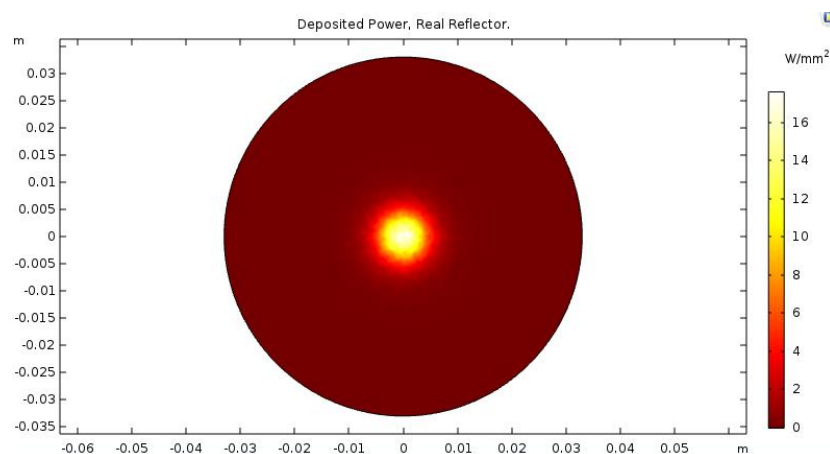


Рис. 4 - Тепловий потік на поверхні приймача для реального рефлектора

Тепловий потік ідеальної системи надзвичайно високий, середня величина близько 28 Вт/мм<sup>2</sup> (у межах  $\pm 5$ мм). В деяких границях ( $\pm 4$ мм) тепловий потік досягає 32 Вт/мм<sup>2</sup>. Це демонструє необхідність усереднення в азимутальному напрямку, щоб більш послідовно порівнювати коефіцієнт концентрації з опублікованими значеннями.

Азимутально усереднені коефіцієнти концентрації для двох випадків нанесено на Рис. 5 та Рис. 6.

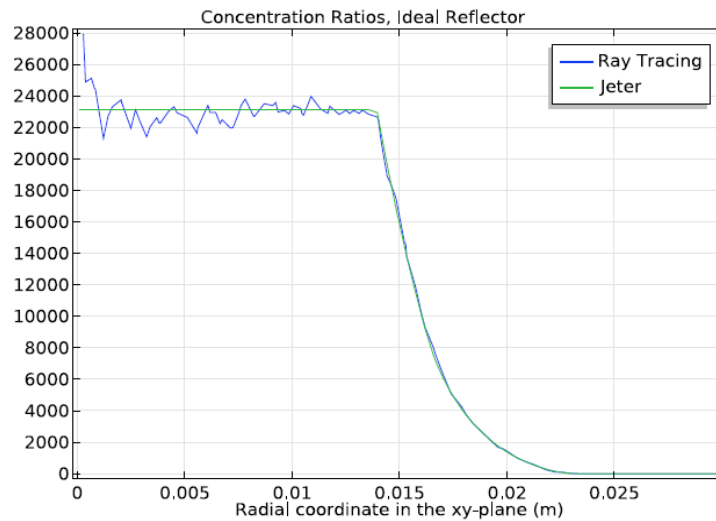


Рис. 5 - Порівняння азимутально усередненого обчисленого коефіцієнта концентрацій у приймачі з напіваналітичним рішенням для ідеального рефлектора

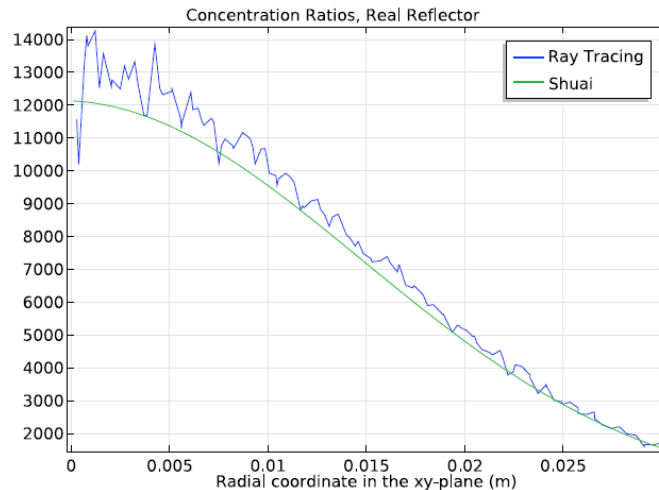


Рис. 6 - Порівняння азимутально усередненого обчисленого коефіцієнта концентрацій у приймачі з напіваналітичним рішенням для реального рефлектора

Обидва варіанти знову підтверджують свою відповідність напіваналітичним результатам. Чіткіша статистична збіжність може бути досягнута тільки шляхом збільшення кількості променів.

Кінцевим етапом є порівняння отриманих результатів, а саме – теплових потоків на поверхні приймача. На рис. 7 видно, що при ідеальній ситуації потік більш сконцентрований в одній точці.

У результаті дослідження моделі трасування променів для ідеального рефлектора



отримано максимальний тепловий потік на одиницю поверхні приймача  $30 \text{ Вт/мм}^2$  та аналогічне середнє значення –  $18 \text{ Вт/мм}^2$ . Для реального рефлектора ці показники відповідно склали  $20 \text{ Вт/мм}^2$  та  $9 \text{ Вт/мм}^2$ .

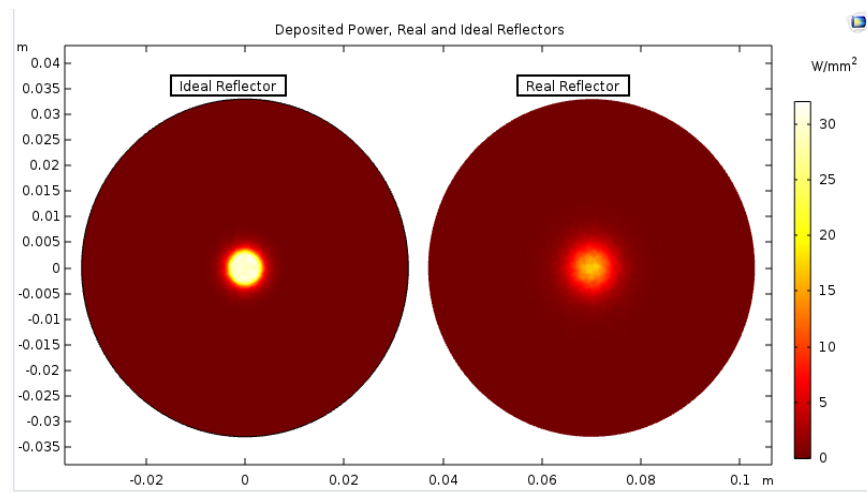


Рис. 7 – Порівняння отриманих теплових потоків на поверхню приймача

**Висновки.** Програмне забезпечення Comsol Multiphysics допомагає зробити прогноз коефіцієнта концентрації ідеалізованого та реального сонячного концентратора для подальшої оцінки доцільності впровадження ПСК на базі двигуна Стірлінга.

В ході дослідження виявлено необхідність врахування всіх реальних факторів впливу для покращення точності моделювання та розрахунку ПСК.

Методологія трасування променів дозволяє оцінити розподіл теплового потоку на поверхню приймача.

#### Література:

1. Захидов Р. Технология и испытания гелиотехнических концентрирующих систем / Р. Захидов. – Т. : Изд-во «ФАН», 1978. – 184 с.
2. Rannels J. The DOE office of solar energy technologies vision for advancing solar technologies in the new millennium / J. Rannels // Solar energy. – 2000. – Vol.69. No. 5. – P. 363–368.
3. Stoudenets V.P. The Characteristics of Solar Dish/Stirling System Based on UDS-1 Machine / V.P. Stoudenets, N.N. Tsyryn, S.S. Dovgyi, N.O. Yemanova// Proceedings IGEC-8 : int. conf., 17–19 June 2013, Kyiv. – Kyiv, 2013.
4. Comsol.net [Електронний ресурс] : [Інтернет-портал]. – Електронні дані. – [Бостон : Comsol Inc., 1986-2018]. – Режим доступа: [www.comsol.net](http://www.comsol.net) (дата звернення 30.03.2018). – Назва з екрана.
5. Shuai, Y. Xia X. Radiation performance of dish solar concentrator and cavity receiver systems / Y. Shuai, X. Xia, H. Tan // Solar Energy. – 2008. – Vol. 82, No. 4. – P. 13 – 28.
6. Jeter S. The distribution of concentrated solar radiation in paraboloidal collectors / S. Jeter // Journal of Solar Energy Engineering. – 1986. – Vol. 108, No. 6. – P. 219 – 225.
7. Hestroffer D. Magnan C. Wavelength dependency of the Solar limb darkening / D. Hestroffer, C. Magnan // Astrophysl. – 1998. – Vol. 333, No. 2. – P. 338 – 342.
8. Особливості моделювання сонячного параболоїдного концентратора в програмному середовищі Comsol Multiphysics : матеріали XVI-ї міжнародної науково-практичної конференції ["Сучасні проблеми наукового забезпечення енергетики"], (Київ, 24-27 бер. 2018 р.) / НТУУ "КПІ ім. І. Сікорського". – Київ : НТУУ "КПІ ім. І. Сікорського", 2018. – 167 с.